

Digitale Bildverarbeitung für die automatisierte Auswertung in der Architekturphotogrammetrie

Von der Fakultät für Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Frank Henze

aus Halle/Saale

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernhard Ritter

Gutachter: Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Rheidt

Tag der Disputation: 21.10.2015

Kurzfassung

Photogrammetrische Verfahren werden immer häufiger für die Objekterfassung und Dokumentation in Archäologie, Bauforschung, Denkmalpflege und Restaurierung eingesetzt. Der Grund hierfür liegt in der mittlerweile vollständigen Digitalisierung des gesamten photogrammetrischen Prozesses sowie in der Verfügbarkeit hoch auflösender Digitalkameras und der für die Auswertung notwendigen, leistungsfähigen Rechentechnik. Analoge Mess- oder Teilmesskameras wurden fast vollständig durch digitale Amateurkameras verdrängt. Den Anwendern stehen damit flexible und kostengünstige Systeme zur photogrammetrischen Objekterfassung zur Verfügung.

Neben der klassischen Bildentzerrung rückt verstärkt die *räumliche* Auswertung von Bildern in den Fokus der Anwender. Die Grundlage für die Berechnung von Bildorientierung, Kamerakalibrierung und 3D-Objektgeometrie bilden dabei die bekannten Modelle der analytischen Photogrammetrie, die zunächst kurz vorgestellt werden. Die photogrammetrischen Verfahren werden ergänzt durch ausgewählte Methoden der digitalen Bildverarbeitung und Bildanalyse. Einen Schwerpunkt bildet dabei die automatisierte Zuordnung homologer Punkte. In Kombination mit angepassten Verfahren der Merkmalsextraktion lässt sich damit der Orientierungsvorgang weitgehend automatisieren. Hierfür werden verschiedene Interest-Operatoren sowie Verfahren zur Korrespondenzanalyse auf ihre Eignung für die speziellen Anwendungsgebiete der Nahbereichsphotogrammetrie untersucht und angepasst.

Im Rahmen der photogrammetrischen Auswertung wird die automatisierte Punktzuordnung zur Bestimmung von dichten 3D-Punktwolken eingesetzt. Unstetigkeiten der Objektoberfläche können mit flächenhaften Zuordnungsverfahren jedoch nicht direkt erfasst werden. In der Literatur existieren daher verschiedene Ansätze zur kantenbasierten Auswertung von Bildern, die vorgestellt und diskutiert werden. Darauf aufbauend wird ein angepasstes Verfahren zur subpixelgenauen Kantenextraktion sowie zur automatisierten Zuordnung der extrahierten Kanten in mehreren Bildern entwickelt und anhand praktischer Beispiele untersucht.

Aufbauend auf den Untersuchungsergebnissen und den Erfahrungen aus unterschiedlichen Praxisprojekten wird ein anwendungsorientiertes Vorgehen zur Erfassung und automatisierten Auswertung von Objekten mit Zwei- und Vier-Kamera-Konfigurationen entwickelt. Da hierbei ausschließlich digitale Amateurkameras zum Einsatz kommen, wird ein vereinfachtes Verfahren zur Kamerakalibrierung vorgeschlagen. Für die äußere Orientierung mehrerer Stereo- bzw. Vier-Kameramodelle in einem einheitlichen Objektsystem wird, neben der klassischen Mehrbildorientierung, die aus Anwendersicht sehr anschauliche Referenzierung über die automatisch gemessenen Punktwolken vorgestellt.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen wird ein Konzept für ein photogrammetrisches Auswertesystem für den Architektur- und Nahbereich entwickelt. Neben der automatisierten Gewinnung räumlicher Objektinformationen aus Bildern sind darin vor allem die zweidimensionalen Umbildungen als wichtige Grundlage für die Erstellung maßstäblicher Planunterlagen berücksichtigt. Anhand ausgewählter Beispiele aus Archäologie und Bauforschung wird schließlich ein Überblick über die Möglichkeiten einer automatisierten Auswertung gegeben.

Abstract

Photogrammetric methods are increasingly used for object recording and documentation in archaeology, building archaeology, heritage conservation and restoration. The reasons for this are the complete digitization of the photogrammetric process and the availability of high-resolution digital cameras and powerful computing technology. Analogue metric or semi-metric cameras were almost completely replaced by digital amateur cameras. This provides end-user with flexible and cost-efficient systems for photogrammetric object recording.

As a result of these developments advanced methods for three-dimensional image evaluation get into the focus of the users on top of conventional image rectification. The basis for the calculation of image orientation, camera calibration and 3D object geometry are established methods of analytical photogrammetry, which are introduced briefly. Photogrammetric methods are complemented by selected methods of digital image processing and image analysis. One main focus of the analyses is the automated correlation of homologous image points. In combination with adapted methods of feature extraction the process of image orientation can be automated to a large extent. Known methods of feature extraction and correspondence analysis are tested for their suitability and adapted for close range applications.

As part of the photogrammetric evaluation image correlation is used for automated determination of dense 3D point clouds. However, discontinuities of the object surface cannot be detected with area-based matching techniques directly. Specialist literature describes various approaches for edge-based image analysis that are presented and discussed. A procedure for edge-based image processing is developed and investigated with practical examples. The basis for this are customized methods for subpixel edge detection and automated matching of edges in multiple images.

Based on the test results and experiences from different field projects an application-oriented approach for automated object recording with stereo and four-camera models is developed. As only digital amateur cameras are used for image acquisition, an adapted procedure for camera calibration is proposed. In addition to the established multi-image orientation for the calculation of exterior orientation of multiple stereo or four-camera models the semi-automatic registration of automatically measured point clouds is presented as an illustrative method.

Finally a concept for an application-based photogrammetric evaluation system is developed especially for architectural and close range application. In addition to the automated extraction of three-dimensional object information from images the two-dimensional image mapping is considered as an important basis for the generation of scaled plan documentations. Selected examples from archaeology and building research give an overview of the possibilities of automated image evaluation.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
1 Einleitung	1
1.1 Thema und Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Gliederung	3
2 Anwendungsgebiete und Anforderungen	5
2.1 Photogrammetrische Objektdokumentation	5
2.2 Genauigkeitsanforderungen	7
2.3 Genauigkeitspotenzial photogrammetrischer Verfahren	8
2.3.1 Fehlereinflüsse bei der Aufnahme	8
2.3.2 Genauigkeit der Bildkoordinatenmessung	10
2.3.3 Fehler im Objektmodell	12
3 Photogrammetrische Verfahren	15
3.1 150 Jahre Architekturphotogrammetrie	15
3.2 Grundlagen der analytischen Photogrammetrie	18
3.2.1 Koordinatensysteme	19
3.2.1.1 Bildkoordinatensystem	19
3.2.1.2 Modellkoordinatensystem	20
3.2.1.3 Objektkoordinatensystem	20
3.2.2 Abbildungsmodell	21
3.2.2.1 Innere Orientierung	21
3.2.2.2 Äußere Orientierung	23
3.2.2.3 Kollinearitätsgleichungen	26
3.2.3 Orientierung eines Stereobildpaares	27
3.2.3.1 Relative Orientierung	28
3.2.3.2 Epipolargeometrie	30
3.2.3.3 Absolute Orientierung	31
3.2.4 Räumlicher Vorwärtsschnitt	31
3.2.5 Räumlicher Rückwärtsschnitt	33
3.2.6 Bündelblockausgleichung	33
3.3 Verfahren der digitalen Architektur- und Nahbereichsphotogrammetrie	34
3.3.1 Automatisierte Messung markierter Objektpasspunkte	35
3.3.2 Einbildauswertung	36
3.3.2.1 Geometrische Bildtransformation / Grauwertinterpolation	37
3.3.2.2 Projektive Transformation / Ebene Bildentzerrung	39
3.3.2.3 Abwicklung	40

3.3.2.4	Differentielle Entzerrung / Orthobildentzerrung	42
3.3.3	Digitale Stereoauswertung	44
3.3.4	Mehrbildauswertung	46
4	Ausgewählte Verfahren der digitalen Bildverarbeitung	51
4.1	Filter	51
4.1.1	Funktionsweise	51
4.1.2	Glättungsfilter	53
4.1.2.1	Erzeugung von Bildpyramiden	54
4.1.3	Einfache Kantenfilter	54
4.2	Interest-Operatoren	56
4.2.1	Förstner-Operator	57
4.2.2	SUSAN-Operator	58
4.2.3	FAST-Operator	58
4.2.4	SIFT- / Lowe-Operator	58
4.2.5	SURF-Operator	59
4.2.6	Auswahl und Optimierung	60
4.3	Flächenbasierte Bildzuordnung	61
4.3.1	Differenz-Korrelation	63
4.3.2	Normierte Kreuzkorrelation	64
4.3.3	Paraboloid-Anpassung	65
4.3.4	Kleinste-Quadrate-Anpassung	66
4.3.5	Evaluierung und Auswahl	68
4.3.5.1	Rotation und Skalierung	68
4.3.5.2	Aufnahmekonfiguration und Sensoren	69
4.3.5.3	Fazit	71
4.4	Kantenextraktion	71
4.4.1	Canny-Operator	72
4.4.2	Subpixelgenaue Kantenlokalisierung	73
4.4.3	Profilgesteuerte Kantenextraktion	75
4.4.4	Hough-Transformation	76
4.5	Kantenzuordnung	78
4.5.1	Linienbasierte Zuordnung	78
4.5.2	Zuordnung über diskrete Kantenpunkte	79
4.5.3	Zuordnungsverfahren in einer Vier-Kamera-Konfiguration	80
4.5.4	Untersuchungsergebnisse und Fazit	82
5	Automatisierte Stereo- und Mehrbildauswertung	85
5.1	Einsatz nicht-metrischer Kameras	86
5.1.1	Verzeichnungskorrektur	86
5.1.2	Kamerakalibrierung	88
5.1.3	Kombiniertes Verfahren	91
5.1.4	Untersuchungsergebnisse	92
5.2	Aufnahmekonfiguration	95
5.2.1	Genäherter Stereonormalfall	95
5.2.2	Erweiterte Vier-Kamera-Konfiguration	97
5.3	Orientierungsverfahren	97
5.3.1	Einzelbildorientierung	97

5.3.2	Relative und absolute Orientierung	98
5.3.3	Interaktive Messung von Verknüpfungspunkten	99
5.3.4	Automatische relative Orientierung	100
5.3.4.1	Punktfestlegung über ein festes Raster	100
5.3.4.2	Merkmalsextraktion mittels Interest-Operatoren	100
5.3.4.3	Eliminierung von Ausreißern mittels RANSAC	101
5.3.4.4	Vergleich der Verfahren	102
5.3.5	Orientierung einer Vier-Kamera-Konfiguration	104
5.3.5.1	Untersuchungsergebnisse	106
5.3.6	Automatisierte Mehrbildorientierung	107
5.3.7	Referenzierung von Stereomodellen über Oberflächengeometrien	108
5.4	Automatisierte Oberflächenmessung	111
5.4.1	Punktbasierte Auswertung	111
5.4.2	Konturbasierte Auswertung	114
5.4.3	Semi-Global Matching	114
5.5	Structure-from-Motion - SfM	115
6	Kombinierte Auswerteverfahren	119
6.1	Kamerakalibrierung	119
6.2	Bildorientierung	120
6.3	Interaktive Stereo- und Mehrbildauswertung	120
6.4	3D-Modellbildung	121
6.5	Generierung von Bildplänen	121
6.5.1	Festlegung von Projektions- und Schnittsystemen	122
6.5.2	Projektive Entzerrung	122
6.5.3	Orthobilderstellung	122
6.5.4	Abwicklung	123
6.6	Entwurf eines kombinierten Auswertesystems	123
7	Anwendungsbeispiele	127
7.1	Dokumentation archäologischer Kleinfunde	127
7.2	Erfassung und Dokumentation von Bauteilfragmenten	129
7.3	Maßliche Rekonstruktion von Objekten	132
7.4	Ansichtsdarstellungen freigelegter Grabungsprofile und Mauerreste	133
7.5	Erstellung von Orthobildplänen gegliederter Fassaden	135
8	Zusammenfassung - Kritik - Ausblick	139
A	Software	143
A.1	Algorithmik und Dateischnittstellen	143
A.2	Anwendungen und Benutzerschnittstellen	145
A.2.1	bikome2D	146
A.2.1.1	Automatische Orientierung eines Stereobildpaares	148
A.2.1.2	Interaktive Messung homologer Punkte	148
A.2.1.3	Verzeichnungskorrektur über Plumblin-Kalibrierung	148
A.2.2	stereo3D	149
A.2.2.1	Interaktive Auswertung	150
A.2.2.2	Punktbasierte Oberflächenmessung	151

A.2.2.3 Kantenbasierte Auswertung	151
A.2.3 OpenGL / GLUT	151
B Farbtafeln der Stereomodelle	153
Abbildungsverzeichnis	157
Literaturverzeichnis	163
Danksagung	175

1 Einleitung

1.1 Thema und Motivation

Photogrammetrische Verfahren werden für die Objekterfassung und -dokumentation in den Bereichen Archäologie, Bauforschung, Denkmalpflege und Restaurierung seit mehr als 100 Jahren regelmäßig eingesetzt. Das Potenzial fotografischer und photogrammetrischer Aufnahmen reicht dabei von der reinen Bilddokumentation im Bereich der Archäologie und Denkmalpflege (siehe ECKSTEIN, 2003), über die Bildinterpretation, zum Beispiel für Schadensdokumentationen (SCHÄFER, 2001), bis hin zur Erstellung maßstäblicher Bildpläne (z.B. HEMMLEB u. a., 2001; WULF-RHEIDT und HENZE, 2008) und komplexer 3D-Modelle für baugeschichtlich-archäologische Untersuchungen (z.B. BÜHRER u. a., 2001; HANKE, 2001). Einen umfassenden Überblick über den Einsatz photogrammetrischer Verfahren in den genannten Bereichen liefern die Beiträge der regelmäßig stattfindenden Symposien und Kongresse der CIPA (<http://cipa.icomos.org>) sowie der Arbeitsgruppe V/2 („Cultural heritage data acquisition and processing“) der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (ISPRS, <http://www.isprs.org>).

Gegenüber diskreten Aufnahmeverfahren, wie dem klassischen Handaufmaß oder der Tachymetrie, liefern photogrammetrische Aufnahmen, neben *geometrischen Informationen*, vor allem eine *bildhafte* und zunächst *interpretationsfreie Dokumentation* der erfassten Objekte. Sie ermöglichen damit eine Auswertung auch zu einem späteren Zeitpunkt mit einer gegebenenfalls völlig neuen Fragestellung. Dies zeigen sehr anschaulich die zahlreichen Beispiele photogrammetrischer Auswertungen historischer Aufnahmen und Messbilder (siehe u.a. VAN DEN HEUVEL, 2001; WIEDEMANN u. a., 2000; BRÄUER-BURCHARDT und VOSS, 2001; HENZE u. a., 2009; SIEDLER u. a., 2011).

Noch bis vor etwa 20 Jahren kamen für die photogrammetrischen Auswertungen überwiegend teure analytische oder analoge Auswertegeräte zum Einsatz (ECKSTEIN, 2001), wodurch die Photogrammetrie als Aufnahmeverfahren überwiegend Behörden, größeren Institutionen oder speziellen Dienstleistungsfirmen vorbehalten blieb. Haupteinsatzgebiet der Photogrammetrie war dabei die topografische Aufnahme mit Hilfe von Senkrecht-Luftbildern und viele der analogen und analytischen Auswertegeräte waren genau darauf optimiert. Die zumeist sehr flexiblen Aufnahmekonfigurationen im Nahbereich konnten mit diesem Instrumentarium nur bedingt ausgewertet werden, so dass die Photogrammetrie als Aufnahmeverfahren nicht die gewünschte Verbreitung finden konnte (ALBERTZ, 1986).

Mit dem Übergang von der analytischen zur rein digitalen Photogrammetrie ist es den Anwendern aus den genannten Bereichen nun zunehmend selbst möglich, photogrammetrische Auswertungen für die Objektdokumentation zu erstellen. Durch den Einsatz hochauflösender digitaler Kameras vereinfacht sich der Aufnahmeprozess erheblich und ein durchgängig digitaler Datenfluss wird möglich. Damit lässt sich der gerätetechnische Aufwand für die

Erstellung photogrammetrischer Aufnahmen und Auswertungen im einfachsten Fall auf (digitale) Kamera und Rechner (inklusive Software) reduzieren. Allerdings beschränkt sich der Einsatz der Photogrammetrie bei den Anwendern derzeit noch weitgehend auf die projektive Entzerrung und Bildmontage am Rechner, während Mehrbildtechniken zur Erstellung dreidimensionaler Auswertungen und Objektdokumentationen nach wie vor Spezialisten vorbehalten bleiben.

Parallel zu den Entwicklungen im Bereich der Photogrammetrie ermöglichte moderne Rechnertechnik innerhalb der letzten 20 Jahre eine enorme Weiterentwicklung auf dem Gebiet der digitalen Bildverarbeitung und Bildanalyse (Computer Vision). Da es auch hier in der Regel um die Gewinnung von Objektgeometrien aus digitalen Bildern geht, ist eine Zusammenführung beider Fachgebiete nur zwangsläufig. Durch eine konsequente Integration von Bildverarbeitungsalgorithmen in die photogrammetrische Auswertung ist eine weitgehende Automatisierung des Auswerteprozesses möglich und es ergeben sich neue Anwendungsszenarien und Einsatzmöglichkeiten für die photogrammetrische Objekterfassung (siehe u.a. HENZE u. a., 2006; REMONDINO und MENNA, 2008; HULLO u. a., 2009). Vor allem die automatische Zuordnung von Bildmerkmalen in zwei oder mehr Bildern erlaubt hierbei eine schnelle, sehr genaue und weitgehend automatisierbare dreidimensionale Auswertung von Objekten. Die manuelle Messung homologer Punkte bei der Zwei- und Mehrbildauswertung kann damit vollständig ersetzt werden.

Im Vergleich zu anderen automatisierten 3D-Aufnahmeverfahren, wie dem terrestrischen Laserscanning oder dem Streifenlichtscanning, zeichnen sich photogrammetrische Verfahren u.a. durch folgende Eigenschaften aus:

- die gewonnenen Bilddaten erlauben neben der geometrischen auch eine inhaltliche Auswertung durch Bildinterpretation
- die fotografische Abbildung liefert eine sehr hohe Informationsdichte und damit auch eine sehr hohe geometrische Auflösung
- diskrete Objektmerkmale (z.B. markante Punkte, Kanten) können in den hochauflösenden Bildern direkt gemessen werden
- automatisierte Messverfahren ermöglichen eine hohe Messgenauigkeit sowohl für signalisierte wie auch für natürliche Punkte
- mit Hilfe digitaler Amateurkameras lassen sich flexible und kostengünstige Aufnahmesysteme realisieren
- die Aufnahmekonfiguration ist i.d.R. frei skalierbar, so dass mit einem Aufnahmesystem Objekte unterschiedlichster Größe erfasst werden können (vom archäologischen Kleinfund bis hin zu größeren Fassaden)

Mit der Entwicklung automatisierter Auswerteverfahren hat die photogrammetrische Objekterfassung damit das Potenzial, sich als eigenständiges Verfahren neben den zunehmend eingesetzten (aktiv) scannenden Verfahren zu etablieren und weiterzuentwickeln.

1.2 Zielsetzung und Gliederung

Trotz der aktuellen Entwicklungen im Bereich der digitalen Photogrammetrie und der Bildanalyse / Bildverarbeitung fehlen weitgehend anwendungsorientierte Lösungen, die auf die speziellen Anforderungen bei der Dokumentation und Auswertung historischer Objekte ausgerichtet sind. Haupteinsatzgebiet photogrammetrischer Systeme für den Nahbereich ist nach wie vor die hochgenaue Objekterfassung im industriellen und ingenieurtechnischen Bereich. Im Vordergrund steht dabei die Gewinnung spezieller geometrischer Informationen für die (Qualitäts-) Kontrolle oder Überwachung einzelner Objektmerkmale. In Kapitel 2 werden daher zunächst die Anforderungen an eine photogrammetrische Objektdokumentation für Archäologie, Bauforschung und Denkmalpflege definiert.

Die Bedeutung photogrammetrischer Verfahren für die in dieser Arbeit fokussierten Anwendungsgebiete wird in Kapitel 3 anhand eines kurzen Überblicks über die geschichtliche Entwicklung der Architektur- und Nahbereichsphotogrammetrie verdeutlicht. Insbesondere der hohe Dokumentationswert fotografischer Abbildungen verbunden mit der Möglichkeit einer geometrischen Auswertung haben hier zur kontinuierlichen Nutzung photogrammetrischer Verfahren beigetragen. Die klassischen Verfahren der analytischen Photogrammetrie stellen auch für die Entwicklung automatisierter Auswerteverfahren eine wesentliche Grundlage dar und sollen daher kurz beschrieben und hinsichtlich ihrer Eignung für die digitale Auswertung bewertet werden. Darauf aufbauend wird ein Überblick über die derzeit regelmäßig eingesetzten Verfahren der digitalen Architektur- und Nahbereichsphotogrammetrie gegeben.

In Kapitel 4 werden ausgewählte Verfahren der digitalen Bildverarbeitung und Bildanalyse vorgestellt und auf ihre Eignung für die automatisierte Auswertung in der Architektur- und Nahbereichsphotogrammetrie hin untersucht und ggf. angepasst. Schwerpunkte bilden dabei die automatisierte Extraktion von Punktmerkmalen sowie die Zuordnung homologer Punkte für die Bildorientierung und Objektauswertung. Da verfahrensbedingt mit flächenbasierten Zuordnungsverfahren nur eingeschränkt eine Bestimmung von Objektkanten möglich ist, soll darüber hinaus untersucht werden, inwieweit Verfahren der Kantenextraktion und Kantenzuordnung für eine photogrammetrische 3D-Auswertung genutzt werden können.

Aufbauend auf den klassischen Verfahren der Photogrammetrie soll in Kapitel 5 ein weitgehend automatisiertes Vorgehen bei der Auswertung stereoskopischer Aufnahmen entwickelt werden. Da als Aufnahmesysteme digitale Amateurkameras zum Einsatz kommen, muss dabei auch eine anwendungsbezogene Bestimmung der Kameraparameter möglich sein. Hierfür werden verschiedene Verfahren der Kamerakalibrierung vorgestellt und näher untersucht. Voraussetzung für eine räumliche Objektauswertung ist die Orientierung aller beteiligten Aufnahmen in einem einheitlichen Koordinatensystem. Aus den bekannten Verfahren zur Bildorientierung soll eine für die automatische Stereoauswertung geeignete Vorgehensweise zur Orientierung von Stereo- und erweiterten Vier-Kamera-Modellen entwickelt werden. Für eine vollständige Objekterfassung müssen in der Regeln mehrere Stereomodelle erstellt und in einem gemeinsamen Koordinatensystem orientiert werden. Als Alternative zur klassischen Mehrbildorientierung wird hierfür die nachträgliche Registrierung der Modelle über gemessene Objektgeometrien untersucht. Mit Hilfe der angepassten Verfahren zur Zuordnung korrespondierender Bildmerkmale lassen sich in den orientierten Bildern Objektgeometrien weitgehend automatisch bestimmen. Hierfür werden Auswertefunktionalitäten benötigt,

die an die besonderen Anforderungen und Fragestellungen bei der Objekterfassung und -dokumentation in Archäologie und Bauforschung hin angepasst sind.

Aus der Zusammenstellung und Bewertung der unterschiedlichen Auswerteverfahren soll in Kapitel 6 ein Konzept für ein anwendungsorientiertes System zur photogrammetrischen Auswertung und Objektdokumentation entwickelt werden. Neben den angepassten Verfahren zur automatisierten Stereo- und Mehrbildauswertung sind dabei auch die klassischen Verfahren der digitalen Einbildauswertung für die Generierung maßstäblicher Bildpläne zu berücksichtigen.

Anhand konkreter Beispiele aus verschiedenen Anwendungsbereichen der baugeschichtlich-archäologischen Forschung werden in Kapitel 7 Ergebnisse der automatisierten Auswertung vorgestellt. Die dabei eingesetzten Verfahren zur Bilderfassung und -auswertung sollen im Hinblick auf ihren praktischen Nutzen für die Objektdokumentation kritisch diskutiert werden.

Schließlich werden in Kapitel 8 die gewonnenen Erkenntnisse aus den Entwicklungen und Untersuchungen in dieser Arbeit sowie die Erfahrungen beim Einsatz photogrammetrischer Verfahren in zahlreichen baugeschichtlich-archäologischen Projekten zusammengefasst und bewertet. Aufbauend darauf soll ein kurzer Ausblick auf weitere Entwicklungen für die automatisierte photogrammetrische Objektdokumentation gegeben werden.

2 Anwendungsgebiete und Anforderungen

Die photogrammetrische Objektdokumentation für Architektur, Bauforschung und Denkmalpflege unterscheidet sich z.T. erheblich von der Anwendung photogrammetrischer Verfahren im industriellen oder ingenieurtechnischen Bereich. Die hier gestellten Anforderungen, insbesondere an die Genauigkeit und die Automatisierung des Auswerteprozesses, lassen sich daher nicht auf die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Anwendungsbereiche übertragen.

Auch hinsichtlich der Ergebnisse einer photogrammetrischen Auswertung muss zwischen den unterschiedlichen Anwendungsgebieten der Nahbereichsphotogrammetrie unterschieden werden. In der baugeschichtlich-archäologischen (Bau-)Aufnahme werden in Abhängigkeit eines bestimmten Arbeitsmaßstabes (siehe Kap. 2.2) alle relevanten Objektinformationen erfasst und dokumentiert. Typischerweise erfolgt diese Dokumentation in Form von Grundriss-, Ansichts- und Schnittzeichnungen, die aus der photogrammetrischen Auswertung abgeleitet werden (RIEDEL u. a., 2011). Die hohe zu erfassende Informationsdichte ist auch der Grund dafür, dass vielfach fotografische Umbildungen (Entzerrungen, Orthobilder, Abwicklungen, siehe Kap. 3.3.2) als Grundlage für die Planerstellung verwendet werden. Zudem erfolgt die Auswertung häufig manuell, da die Fülle sehr unterschiedlicher Objektinformationen und Befunde (u.a. Bearbeitungsqualität, Oberflächenzustand, Schäden, Bearbeitungsspuren, Material, ...) kaum automatisch zu erfassen ist.

Im Gegensatz dazu werden in der industriellen Photogrammetrie (vergleichsweise) wenige Informationen zum Objekt erfasst. Häufig handelt es sich dabei um explizit vorgegebene Objektpunkte, die über signalisierte Zielformen automatisch und damit hochgenau angemessen werden können. Für die Erfassung von Oberflächen werden ggf. Muster auf das Objekt projiziert, was jedoch nur unter kontrollierten Beleuchtungsbedingungen möglich ist, im Rahmen archäologischer Grabungen oder baugeschichtlicher Untersuchungen aber kaum realisiert werden kann. Ergebnis einer photogrammetrischen Vermessung im industriellen Bereich sind in der Regel die Koordinaten diskreter Punkte und daraus abgeleitete geometrische Informationen wie Abstände, Oberflächen oder Soll-Ist-Vergleiche. Eine über die reine Objektgeometrie hinausgehende flächenhafte Dokumentation weiterer Objektinformationen erfolgt gewöhnlich nicht.

In Tabelle 2.1 sind die wesentlichen Merkmale photogrammetrischer Aufnahmen für beide Anwendungsbereiche gegenübergestellt.

2.1 Photogrammetrische Objektdokumentation

Viele der vollautomatischen Auswerteverfahren in der Photogrammetrie basieren auf dem Vorhandensein bestimmter geometrischer Bedingungen am Objekt. So werden für alle Verfahren der automatisierten Fluchtpunktbestimmung parallele Linien am Objekt benötigt (VAN DEN HEUVEL, 2003) bzw. werden für Objektrekonstruktionen aus nur einer Aufnahme

	Industrie-/Ingenieur- photogrammetrie	Architektur- photogrammetrie
Aufnahmesituation	kontrollierte Beleuchtung, meist Innenaufnahmen	wechselnde Beleuchtungsverhältnisse, häufig Außenaufnahmen
Flexibilität	speziell angepasste Aufnahmesysteme für konkrete Anwendung, feste Aufnahmekonfiguration	flexible Aufnahmesysteme für sehr unterschiedliche Objekte, variable Aufnahmekonfiguration
Genauigkeit	sehr hohe Genauigkeit (0,5 - 0,01 mm)	mittlere bis hohe Genauigkeit (10 - 0,5 mm)
Automatisierung	weitgehend autom. Kalibrierung, Orientierung und Auswertung	teilweise autom. Orientierung, Auswertung i.d.R. manuell
Objektinformationen	signalisierte Zielmarken, Konturen, Musterprojektion	natürliche Objektpunkte, Oberflächentextur, Konturen
Ergebnisse	Koordinaten, Abstände, ggf. Oberflächen	grafische Auswertung, Oberflächen, fotogr. Umbildungen

Tabelle 2.1: Merkmale photogrammetrischer Aufnahmen für den industriellen Bereich und für den Architekturbereich

Symmetrie und Rechtwinkligkeit von Flächen und Kanten vorausgesetzt (VAN DEN HEUVEL, 2001). Auch bei kantenbasierten Verfahren erfolgt in der Regel eine Approximation der extrahierten Kantenpunkte durch Liniensegmente oder Geraden (siehe z.B. FAUGERAS, 1993; ZHANG und BALTSAVIAS, 2000; HEMMLEB, 2002), die, je nach Grad der Vereinfachung, zu einer Abweichung von der tatsächlichen Form und Gestalt des Objektes führt.

In den hier vorgestellten Anwendungsgebieten können solche Annahmen und Restriktionen jedoch nur in Ausnahmefällen vorausgesetzt werden. Ein Prinzip der formgetreuen archäologischen Bauaufnahme ist es ja gerade, die wahre Form eines Objektes zu bestimmen, ohne im Vorfeld Annahmen über geometrische Eigenschaften zu treffen (siehe u.a. WEFERLING, 2001; SCHULLER, 2002; ECKSTEIN, 2003). Aus den so erfassten Deformationen, d.h. den Abweichungen von einer bestimmten geometrischen Form, lassen sich dann u.a. Aussagen über bauliche Veränderungen oder die Qualität der Bauausführung treffen.

Die bildbasierte, zeichnerische oder interaktive Auswertung photogrammetrischer Aufnahmen hat daher, trotz der Entwicklungen im Bereich der digitalen Bildverarbeitung und Bildanalyse, nach wie vor einen hohen Stellenwert für die baugeschichtlich-archäologische Objektdokumentation. Maßstäblich ausbelichtete Entzerrungen, Orthobilder und Abwicklungen werden daher auch im Zeitalter der digitalen Photogrammetrie noch immer als Grundlage für händische Kartierungen vor Ort eingesetzt (RHEIDT und ROHN, 2011; RIEDEL u. a., 2011).

Auch die interaktive stereoskopische Auswertung kommt für die detaillierte Erfassung räumlich stark gegliederter Objekte regelmäßig zum Einsatz (ECKSTEIN, 2001; BRUSCHKE, 2006). Die stereoskopische Messung ermöglicht dabei die Bestimmung von Oberflächenpunkten auch in wenig strukturierten Objektbereichen, deren Erfassung mit anderen Aufnahmeverfahren

(z.B. Mehrbildauswertung, Laserscanning, Tachymetrie) kaum möglich ist. Durch die räumlichen Wahrnehmung des (virtuellen) Objektmodells bei der stereoskopischen Betrachtung besteht zudem die Möglichkeit, neben (oder auch unabhängig von) der *geometrischen* Auswertung eine darüber hinausgehende *inhaltliche* Auswertung, mit ggf. ganz anderen Fragestellungen, durchzuführen. Aus den Ergebnissen einer automatisierten Stereoauswertung, zusammen mit den hochauflösenden Bildern, lassen sich schließlich wieder die für die zweidimensionale Auswertung benötigten Umbildungen generieren.

Zunehmend werden in der historischen Forschung auch dreidimensionale Objektmodelle für die Untersuchung und Rekonstruktion komplexer baulicher Zusammenhänge oder für Visualisierungszwecke verwendet (siehe Beiträge in HEINE u. a., 2011). Mit Hilfe der Stereophotogrammetrie lassen sich dreidimensionale Objektgeometrien interaktiv oder automatisiert bestimmen, die als Grundlage für eine 3D-Modellierung dienen können. Die Bilddaten der beteiligten Stereoaufnahmen können dabei als Texturinformationen für eine fotorealistische Visualisierung verwendet werden.

2.2 Genauigkeitsanforderungen

Bei der Objekterfassung und -dokumentation für Architektur, Bauforschung und Denkmalpflege wird meist zwischen der *Messgenauigkeit* der eingesetzten Aufnahmeverfahren einerseits und der vom Abbildungsmaßstab abhängigen *Darstellungsgenauigkeit* andererseits unterschieden. Ausgehend von einem durch den Anwender festgelegten Abbildungsmaßstab lassen sich über die Darstellungsgenauigkeit letztlich Aussagen zur Wahl des Aufnahmeverfahrens treffen. Anhaltspunkte für die im Bereich Bauforschung und Denkmalpflege geforderten Genauigkeiten liefern die in (ECKSTEIN, 2003) aufgeführten Genauigkeitsstufen I bis IV. Die Spanne reicht dabei vom „schematischen Aufmaß“ im Maßstab 1:100 in Genauigkeitsstufe I, über das „annähernd wirklichkeitsgetreue“ sowie „verformungsgetreue Aufmaß“ in den Genauigkeitsstufen II und III mit Darstellungsmaßstäben zwischen 1:100 und 1:50, bis hin zum „verformungsgetreuen Aufmaß mit detaillierter Darstellung“ in Genauigkeitsstufe IV mit Maßstäben von 1:25 oder größer. In Abhängigkeit vom Abbildungsmaßstab werden hier, neben der geforderten Messgenauigkeit, vor allem die in der jeweiligen Genauigkeitsstufe zu erfassenden Bauelemente und Objektgeometrien aufgeführt.

Bei der händischen Kartierung kann die Darstellungsgenauigkeit aus der maximal erreichbaren Genauigkeit für das zeichnerische Auftragen abgeleitet werden, die in der Regel mit $\pm 0,2 - 0,5$ mm angegeben wird. Für die in den Genauigkeitsstufen III und IV üblichen Abbildungsmaßstäbe ergeben sich daraus Genauigkeitsanforderung bei der Aufnahme von ± 10 mm im Maßstab 1:50 bzw. ± 5 mm im Maßstab 1:25. Die Erfassung einzelner Bauteile oder baulich-konstruktiver Details erfolgt z.T. für Maßstäbe von 1:10 bis 1:1. Hier entspricht die Darstellungsgenauigkeit dann der Messgenauigkeit, da in der Regel alle relevanten Details auch dargestellt werden können.

Für die Erfassung und Weiterverarbeitung von Objektgeometrien kommen zunehmend digitale Verfahren zum Einsatz, bei denen es eine Beschränkung hinsichtlich der Darstellungsgenauigkeit zunächst nicht gibt. Da in digitalen grafischen Systemen (CAD, GIS, Kartierung) die Informationsdichte, d.h. der minimale Abstand einzelner geometrischer Elemente, lediglich durch die Rechengenauigkeit der Software begrenzt wird, entspricht die Darstellungsgenauigkeit hier der Messgenauigkeit. In Abhängigkeit der Fragestellung und der zur Verfügung

stehenden Messverfahren wird man sich jedoch auch hier, in Anlehnung an die oben aufgeführten Genauigkeitsstufen, für einen bestimmten Arbeitsmaßstab entscheiden, mit dem die zu erfassenden Objektgeometrien sinnvoll abgebildet werden können.

Weitere Ausführungen zum Genauigkeitsbegriff im Bereich der Bauforschung und Denkmalpflege finden sich u.a. in (ECKSTEIN, 2003; SCHULLER, 2002; WEFERLING, 2001).

2.3 Genauigkeitspotenzial photogrammetrischer Verfahren

Im Gegensatz zu direkten Messverfahren, wie dem Handaufmaß, der Tachymetrie oder auch dem Laserscanning, sind photogrammetrisch gewonnene Messdaten das Ergebnis einer oft komplexen Prozesskette. Die Genauigkeit des Endproduktes hängt dabei von zahlreichen Faktoren innerhalb der einzelnen Arbeitsschritte ab:

- Wahl eines geeigneten Aufnahmeverfahrens
- Aufnahmekonfiguration: Schnittbedingungen, Aufnahme-Basis-Verhältnis
- Genauigkeit und geom. Konfiguration der Pass- bzw. Referenzinformationen
- Qualität und Auflösung des Aufnahmesystems
- Bildmessgenauigkeit bzw. Genauigkeit der Zuordnung homologer Bildpunkte
- Genauigkeit der Parameter des Aufnahmesystems (Kameraparameter)
- ggf. Genauigkeit und Auflösung des Digitalisiervorgangs (Scannen analoger Bilder)
- ggf. Genauigkeit des zugrundeliegenden Objektmodells (Ebene, Zylinder, Digitales Oberflächenmodell - DOM)

Während die Anforderungen für die Genauigkeitsstufen I und II (siehe Kap. 2.2) auch mit einfachen (photogrammetrischen) Aufnahmeverfahren und -geräten erfüllt werden können, müssen für höhere Genauigkeiten der Stufen III und IV die eingesetzten Verfahren und Geräte sorgfältig gewählt werden. Für die photogrammetrische 3D-Objekterfassung im Rahmen einer Stereo- bzw. Mehrbildauswertung muss dafür, neben der Verwendung kalibrierter Kameras, vor allem auf eine geeignete Aufnahmekonfiguration geachtet werden. In Abhängigkeit der Bildmessgenauigkeit lassen sich damit aus dem Bildmaßstab bzw. aus dem Verhältnis von Aufnahmeabstand zur Basislänge Aussagen zu der erreichbaren Messgenauigkeit treffen.

2.3.1 Fehlereinflüsse bei der Aufnahme

Bereits bei der photogrammetrischen Aufnahme vor Ort wird durch die verwendete Aufnahmetechnik und die gewählte Aufnahmekonfiguration die Qualität der späteren Auswertung beeinflusst. Allgemein gilt für alle photogrammetrischen Verfahren, dass sich die Unsicherheit in der Messung der Bildkoordinaten $\sigma_{x'}$ mit der Bildmaßstabszahl m_b in den Objektraum überträgt:

$$\sigma_X = m_b \cdot \sigma_{x'} \quad (2.1)$$

mit

$$m_b = \frac{h}{c_k} = \frac{X}{x'} = \frac{1}{M_b} \quad (2.2)$$

m_b ist dabei das Verhältnis von Aufnahmeabstand h zur Kamerakonstante c_k bzw. einer Strecke X im Objektraum zur zugehörigen Strecke x' im Bildraum (siehe Kap. 3.2.1).

Erfolgt eine Entzerrung oder Bildorientierung auf Grundlage von Passinformationen am Objekt, so muss sowohl die Genauigkeit dieser Daten als auch deren Anordnung im Objektraum berücksichtigt werden. Für eine projektive Entzerrung beispielsweise sollten die Passinformationen den auszuwertenden Bildbereich möglichst einschließen, um die Auswirkungen fehlerhafter Messungen der Objektgeometrien sowie bei der Bildkoordinatenmessung zu minimieren (Abbildung 2.1).



(a) ungünstige Anordnung der Passinformationen in Form eines zu kleinen Rechtecks



(b) gleichmäßige Passpunktverteilung

Abbildung 2.1: Anordnung von Passinformationen am Objekt für die projektive Entzerrung

Für die Stereoauswertung erhält man aus der Fehlerfortpflanzung für den Stereonormalfall die folgenden Abhängigkeiten der Objekt- bzw. Modellkoordinaten von der Parallaxenmessgenauigkeit σ_{px} (siehe z.B. KRAUS, 1997, S. 27):

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sqrt{\left(\frac{x_1}{c_k} m_b \frac{Z}{B} \sigma_{px}\right)^2 + (m_b \cdot \sigma_x)^2} \\ \sigma_y &= \sqrt{\left(\frac{y_1}{c_k} m_b \frac{Z}{B} \sigma_{px}\right)^2 + (m_b \cdot \sigma_y)^2} \\ \sigma_z &= m_b \frac{Z}{B} \sigma_{px} = \frac{Z^2}{c_k \cdot B} \sigma_{px} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Aus den Gleichungen (2.3) lassen sich folgende grundsätzliche Aussagen zur Genauigkeit photogrammetrischer Auswertungen treffen:

- Die mittleren Fehler aller drei Koordinatenrichtungen sind bei konstantem Basisverhältnis B/Z direkt proportional zur Bildmaßstabszahl m_b .
- Der mittlere Fehler in Aufnahme­richtung σ_z ist bei konstantem Bildmaßstab m_b umgekehrt proportional zum Basisverhältnis B/Z .
- Unter Beibehaltung des Basisabstandes B wächst der mittlere Fehler in Aufnahme­richtung σ_z mit dem Quadrat der Aufnahmeentfernung Z .

Die Einflüsse aus Passpunktgenauigkeit und -verteilung, Aufnahmegeometrie sowie Identifizierbarkeit der Messpunkte werden in der Literatur (FRASER, 1996; LUHMANN, 2000) zu einem Design-Faktor q zusammengefasst, womit Gleichung (2.1) wie folgt erweitert wird:

$$\sigma_X = q \cdot m_b \cdot \sigma_{x'} \quad (2.4)$$

Allerdings wird dieser Design-Faktor meist im Rahmen einer Mehrbild-Aufnahmeplanung eingeführt, um vor allem die Schnittgeometrien der Abbildungsstrahlen zusammen mit der benötigten Anzahl der Bilder und Passinformationen abzuschätzen. Für die hier diskutierten Anwendungsfälle scheint die Verwendung eines Design-Faktors zu abstrakt. Vielmehr sollen durch die konkreten Beispielrechnungen zur Genauigkeitsabschätzung Anhaltspunkte für eine photogrammetrische Aufnahmeplanung gegeben werden.

Neben den bereits erwähnten Einflüssen aus Aufnahmegeometrie und Passinformationen hängt die Genauigkeit einer photogrammetrischen Auswertung auch von den optischen und geometrischen Eigenschaften des Aufnahmesystems ab. Die Parameter der inneren Orientierung beschreiben dabei die Lage des Projektionszentrums im kamerafesten Bildkoordinatensystem sowie die Abweichungen vom mathematischen Modell der zentralperspektiven Abbildung. Während für die projektive Entzerrung lediglich die Verzeichnungsparameter der verwendeten Optik berücksichtigt werden, müssen für alle Verfahren der Bildorientierung zusätzlich die Kamerakonstante c_k und die Lage des Bildhauptpunktes (x_H, y_H) bekannt sein. Je nach Anwendungsgebiet und Aufnahmesystem existieren hierfür verschiedene Ansätze zur Kamerakalibrierung (siehe u.a. BROWN, 1971; KUPFER und WESTER-EBBINGHAUS, 1985; GODDING, 1993; FRYER, 1996; REMONDINO und FRASER, 2006). In Kapitel 5.1.2 werden einige Verfahren der Kamerakalibrierung kurz vorgestellt.

Eine detaillierte Übersicht über die Einflüsse der Fehler der inneren und äußeren Orientierung auf die Berechnung der Modell- bzw. Objektkoordinaten findet sich in (RÜGER u. a., 1987) sowie in (REGENSBURGER, 1990).

2.3.2 Genauigkeit der Bildkoordinatenmessung

Im Verlauf der photogrammetrischen Auswertung kommen weitere Faktoren hinzu, die ebenfalls die Genauigkeit der Objektkoordinatenbestimmung beeinflussen.

In Abhängigkeit des verwendeten Auswertesystems stehen verschiedene Verfahren der Bildkoordinatenmessung zur Verfügung. Im einfachsten Falle werden die Bildkoordinaten unter Nutzung der Zoomfunktion des Messprogramms manuell vom Bearbeiter gemessen. Damit lassen sich Bildmessgenauigkeiten im Einzelbild zwischen 0,5 bis 1 Pixel erreichen. Bei der

manuellen Messung natürlicher, nicht signalisierter Objektpunkte verschlechtert sich dieser Wert jedoch aufgrund der Unsicherheit bei der Definition eines eindeutigen Punktzentrums.

Durch die gleichzeitige Betrachtung zweier zugehöriger Bildausschnitte bei der manuellen stereoskopischen Messung verbessert sich das Signal-zu-Rausch-Verhältnis mit $\sqrt{2}$ um 41% (MEIER, 2003), wodurch die Detailerkennbarkeit und damit die Messgenauigkeit erhöht wird. Für die resultierenden Fehler der Modell- bzw. Objektkoordinaten wird daher nicht mehr der Fehler einer einzelnen Bildpunktmessung, sondern vielmehr die Parallaxenmessgenauigkeit angegeben (LUHMANN, 2000):

$$\sigma_{px} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{2}} \quad (2.5)$$

Durch den Einsatz automatisierter Messverfahren für signalisierte Punkte bzw. für homologe Punkte in Stereobildern oder Mehrbildverbänden (siehe Kapitel 4) lässt sich die Messgenauigkeit im Bild gegenüber der manuellen Messung nochmals um den Faktor 10 bis 50 steigern (LUHMANN, 2000).

Beispiel 2.1:

Ein Architekturbauteil soll für eine Dokumentation im Maßstab 1:10 mit Hilfe von Stereoaufnahmen erfasst werden. Bei einer Kamerakonstante von $c_k = 35$ mm und einem Basisabstand von $b = 30$ cm wurde ein Aufnahmeabstand von 2 m gewählt. Die eingesetzte Digitalkamera hat eine Sensorgröße von 23 mm x 15,5 mm. Mit einer Auflösung von 4256 x 2848 Pixel ergibt sich daraus die Größe eines Sensorelementes mit 5,4 μ m. Gesucht ist die Genauigkeit für die manuelle Auswertung sowie für eine Auswertung mit automatisierter Bildzuordnung.

Bei manueller Messung ergibt sich aus Gleichung (2.5) die Parallaxenmessgenauigkeit mit:

$$\sigma_{px} = \frac{5,4 \mu\text{m}}{\sqrt{2}} \approx 4 \mu\text{m}$$

Die Bildmaßstabszahl beträgt nach Gleichung (2.2):

$$m_b = \frac{2000 \text{ mm}}{35 \text{ mm}} \approx 60$$

Für die manuelle Messung ergibt sich aus Gleichung (2.3) eine Genauigkeit am Objekt in x-y-Richtung von:

$$\sigma_x = \sigma_y \approx 60 \cdot 0,0054 \text{ mm} = 0,3 \text{ mm}$$

Die Genauigkeit der Tiefenmessung in Aufnahme-Richtung beträgt bei manueller Messung:

$$\sigma_z = 60 \cdot \frac{2000 \text{ mm}}{300 \text{ mm}} \cdot 0,004 \text{ mm} = 1,6 \text{ mm}$$

Durch Einsatz automatisierter Bildzuordnung für die stereoskopische Messung mit 10fach höherer Bildmessgenauigkeit erhält man demnach:

$$\begin{aligned} \sigma_x = \sigma_y &= 0,03 \text{ mm} \\ \sigma_z &= 0,16 \text{ mm} \end{aligned}$$

Die Anforderungen für eine Kartierung im Maßstab 1:10 sind damit erfüllt.

2.3.3 Fehler im Objektmodell

Bei projektiver Entzerrung, Abwicklung und Differentialentzerrung/Orthobilderstellung erfolgt eine Neuberechnung der Bildinhalte aufgrund von Annahmen über die Objektgeometrie (siehe Kap. 3.3.2). Entsprechen diese Annahmen nicht der tatsächlichen Objektgeometrie, kommt es zu einem Lageversatz im neu berechneten Bild (siehe Abbildung 2.2).



Abbildung 2.2: Lageversatz bei der projektiven Entzerrung aufgrund der Tiefengliederung

Die Größe des Lageversatzes im Bild $\Delta r'$, bzw. dessen Auswirkung im Objektraum Δr lassen sich, entsprechend Abbildung 2.3, wie folgt berechnen:

$$\Delta r' = \frac{r'}{h} \Delta h \quad (2.6)$$

$$\Delta r = \frac{h}{c_k} \Delta r' = m_b \Delta r' \quad (2.7)$$

Der Lageversatz im Objektraum Δr ist damit abhängig:

- vom Abstand des Punktes zur Entzerrungsebene Δh ,

- von der Kamerakonstante (Brennweite) c_k
- sowie vom Abstand des Bildpunktes vom Bildhauptpunkt r' .

Neben dem Lageversatz werden Objekte vor bzw. hinter der jeweiligen Bezugsfläche zudem in einem anderen Maßstab abgebildet. Die Maßstabsdifferenz lässt sich über Gleichung 2.2 abschätzen und ist abhängig:

- vom Abstand des Punktes zur Entzerrungsebene Δh ,
- von der Kamerakonstante (Brennweite) c_k
- sowie vom Aufnahmeabstand h .

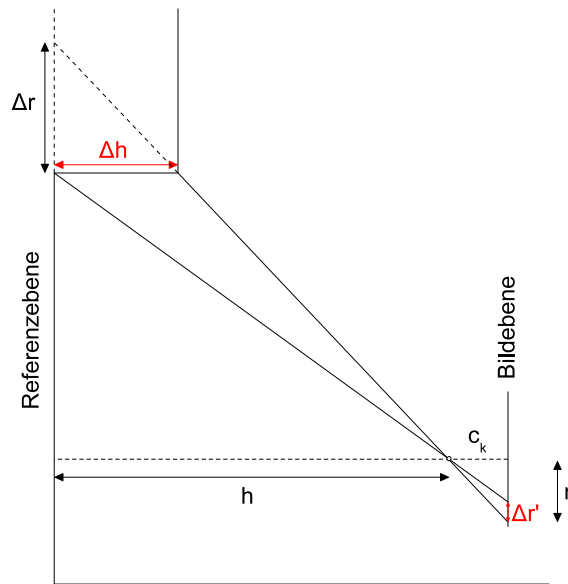


Abbildung 2.3: Lageversatz

Beispiel 2.2:

Die Aufnahmen in Abbildung 2.2(a) wurden mit einer Linhof 4x5 Technika mit einem nutzbaren Bildformat von etwa 10 cm x 12 cm, unter Verwendung eines 75 mm Objektivs erstellt. Der maximale Aufnahmeabstand betrug 8 m, die Tiefe der Fensteröffnungen bis zum Maßwerk 60 cm. Die Bilder sollen für eine Fassadenkartierung im Maßstab 1:50 entzerrt werden. Gesucht ist der maximale Abstand eines Objektpunktes von der Referenzebene, damit der Lagefehler innerhalb der Zeichengenauigkeit für den geforderten Maßstab liegt.

Mit Gleichung (2.1) ergibt sich aus der Zeichengenauigkeit von 0,3 mm für den Maßstab 1:50 eine zu erreichende Objektgenauigkeit von:

$$\sigma_X = m_b \cdot \sigma_{x'} = 50 \cdot 0,3 \text{ mm} = 15 \text{ mm}$$

Mit einem maximalen Bildradius von $r'_{max} = 7,8 \text{ cm}$ erhält man mit Gleichung (2.6) und Gleichung (2.7):

$$\Delta h = \Delta r \frac{c_k}{r'_{max}} = 15 \text{ mm} \cdot \frac{75 \text{ mm}}{78 \text{ mm}} \approx 15 \text{ mm}$$

Aufgrund des großen Bildwinkels führen also bereits Abweichungen von 15 mm zur Entzerrungsebene im Maßstab 1:50 zu einem die Zeichengenauigkeit übersteigenden Lageversatz.

3 Photogrammetrische Verfahren

Bevor in diesem Kapitel die für diese Arbeit relevanten Verfahren der digitalen Photogrammetrie vorgestellt werden, wird zunächst ein kurzer Überblick über die Entwicklung der Architektur- und Nahbereichsphotogrammetrie seit ihrer Einführung vor 150 Jahren gegeben werden.

Vor allem in den Bereichen Archäologie, Bauforschung und Denkmalpflege haben die historischen Verfahren der Photogrammetrie in erweiterter und angepasster Form nach wie vor Bedeutung für die Erfassung und Dokumentation baulicher Objekte. Zum einen spielt hier der hohe Dokumentationswert fotografischer bzw. photogrammetrischer Aufnahmen eine besondere Rolle bei der Objekterfassung: häufig werden für die Dokumentation kulturgeschichtlich bedeutsamer Objekte nach wie vor großformatige Analogaufnahmen verwendet, die einerseits eine langfristige Archivierung garantieren, zum anderen aber auch, mit Hilfe aktueller Auswerteverfahren, präzise photogrammetrische Auswertungen ermöglichen.

Im Gegensatz zur Industriephotogrammetrie oder der Luftbilddauswertung haben für die detaillierte Objektdokumentation in den genannten Anwendungsgebieten automatische Messverfahren eine weitaus geringere Bedeutung. Im Vordergrund stehen hier vielmehr die genaue Beobachtung, Beschreibung und Interpretation der erfassten Objekte auf der Basis klassischer bildbasierter Auswerteverfahren, wie der projektiven Entzerrung oder der interaktiven Stereoauswertung.

3.1 150 Jahre Architekturphotogrammetrie

Die Entwicklung der Photogrammetrie beginnt 1858, also vor mehr als 150 Jahren im Zusammenhang mit der Bauaufnahme des Wetzlarer Domes. Der mit der Aufnahme beauftragte deutsche Architekt und Bauingenieur Albrecht Meydenbauer (1834 - 1921) entkam bei seiner händischen Vermessung nur knapp einem Absturz aus etwa 20 m Höhe. Dieser Vorfall brachte Meydenbauer auf die Idee, durch Umkehrung des perspektivischen Zeichnens alle notwendigen Maße aus fotografischen Bildern zu gewinnen (MEYDENBAUER, 1911). In den folgenden 25 Jahren entwickelte Meydenbauer, der nach wie vor hauptberuflich als Baumeister und Baurat tätig war, Verfahren und Geräte für die Architekturphotogrammetrie. Sein Engagement gipfelte schließlich in der Gründung der Königlich Preussischen Messbildanstalt im Jahre 1885, die er bis zu seinem 75. Lebensjahr 1909 leitete. In dieser Zeit konnten Meydenbauer und seine Mitarbeiter mehr als 1.100 Bauwerke im In- und Ausland in über 13.000 Aufnahmen erfassen (GRIMM, 1977). Ein Großteil der Messbilder, zusammen mit weiteren Aufnahmen aus den Folgejahren, findet sich heute im Messbildarchiv beim Brandenburgischen Landesamt für Archäologie und Denkmalpflege. Dieses Archiv stellt einen unschätzbaren Wert für die Rekonstruktion zerstörter Bauten dar und verdeutlicht sehr eindrucksvoll den hohen Dokumentations- und Informationsgehalt photogrammetrischer Aufnahmen. In

(MEYER, 1985) findet sich ein Überblick über die umfangreichen Arbeiten Meydenbauers zur Entwicklung der Photogrammetrie zusammen mit zahlreichen Messbildaufnahmen aus dem In- und Ausland.



(a) Südfassade des Potsdamer Stadtschlusses



(b) Stadtansicht von Baalbek/Libanon

Abbildung 3.1: Historische Messbilder, aufgenommen von Albrecht Meydenbauer zu Beginn des 20. Jh. (Messbildarchiv beim Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege, Bild-Nr. 1634-2 und 2083-28)

Bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts erfolgte die Auswertung von Messbildern in grafischer Form nach dem Verfahren der Messtischphotogrammetrie. Das Architekturobjekt wird dabei von zwei (bekannten) Standpunkten aus aufgenommen und unter Nutzung der zentralperspektiven Geometrie über Strahlenschnitte rekonstruiert (siehe Abbildung 3.2). Vor allem die Auswertung ist jedoch so aufwendig, dass die Photogrammetrie als Messverfahren kaum Verbreitung findet („Die alte, um die Mitte des vorigen Jahrhunderts begründete Photogrammetrie konnte nicht leben und nicht sterben.“, PULFRICH, 1923).

Von eben jenem Carl Pulfrich wird im Jahre 1901 der Stereokomparator entwickelt, der die hochgenaue Messung von Parallaxen, d.h. von Bildkoordinatenunterschieden, in stereoskopischen Bildpaaren ermöglicht (SZANGOLIES, 1986). Damit ist es nun direkt möglich, Tiefeninformationen aus Stereobildpaaren messtechnisch zu bestimmen und in Kombination mit sog. Autostereographen bzw. Stereoautographen (Abbildung 3.3) linienweise zu kartieren. Die Photogrammetrie ist damit, laut Otto von Gruber, die „Kunst, Rechnungen zu vermeiden“. Hauptanwendungsgebiet der Stereobildauswertung in dieser Zeit ist die topografische und ingenieurtechnische Aufnahme für Eisenbahnbauvorhaben, Talsperrenanlagen, Kanalanlagen und Tagebaue (PULFRICH, 1923), aber auch Architekturaufnahmen lassen sich mit den entwickelten Geräten und Verfahren auswerten. Die grundlegenden Methoden und gerätetechnischen Realisierungen für die Stereobildauswertung waren noch bis Anfang der 1990er Jahre in zahlreichen Behörden und Instituten in Gebrauch (vergleiche GRÜN, 1994; ECKSTEIN, 2001).

Parallel zu diesen Entwicklungen werden von Theodor Scheimpflug Theorie und Geräte zur Einzelbildentzerrung entwickelt. Damit wird es möglich, für ebene Objektbereiche maßstabs-

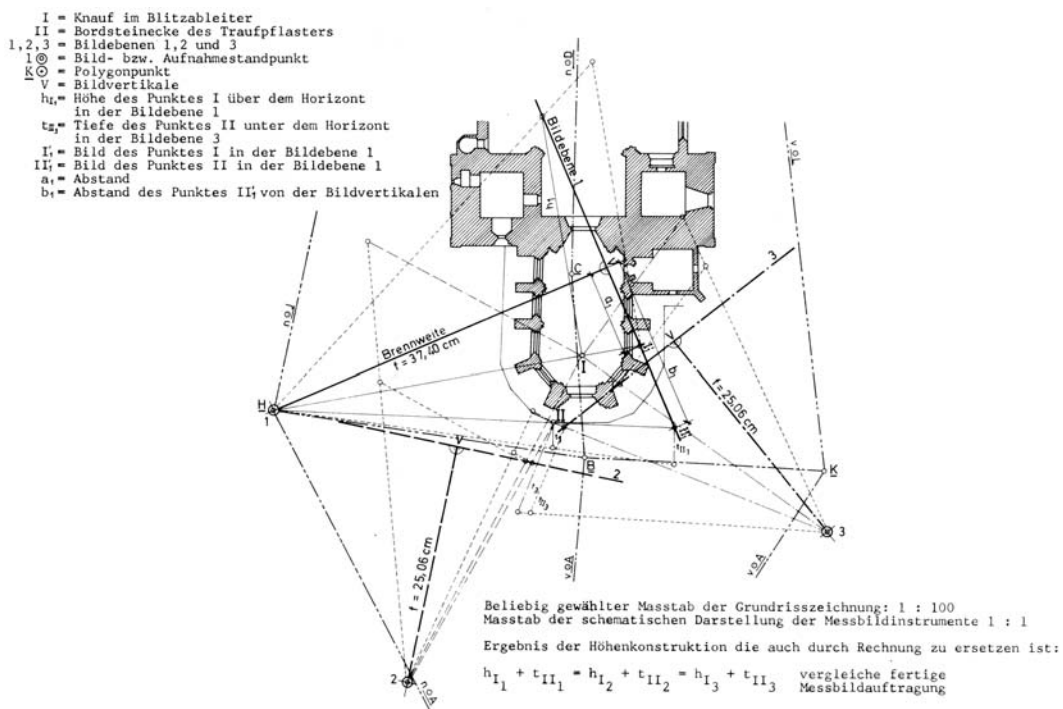


Abbildung 3.2: Konstruktionszeichnung zum Einschneideverfahren (aus GRIMM, 1977)

gerechte projektive Umbildungen anzufertigen und direkt als Kartierungsgrundlage zu nutzen. In den folgenden Jahren werden die Geräte und Verfahren unter Beibehaltung der alten Prinzipien kontinuierlich weiterentwickelt und verfeinert. Insbesondere kommt es zu einer deutlichen Verkleinerung der Aufnahmekammern von einem Bildformat $40 \times 40 \text{ cm}^2$ zur Zeit Meydenbauers auf eine Bildgröße von $18 \times 18 \text{ cm}^2$ und kleiner. Am Prinzip der Aufnahme im Stereonormalfall und der opto-mechanischen Auswertung mittels Stereokomparator ändert sich bis Ende der 1960er Jahre jedoch wenig. Dies mag auch ein Grund dafür sein, dass die Architekturphotogrammetrie unter Nutzung dieser Geräte und Verfahren wenig Beachtung findet. Zu kompliziert sind die technischen Hilfsmittel und die Investitionen für Messkammern und Präzisionsauswertegeräte sind sehr hoch.

Erst gegen Ende der 1960er Jahre wird die klassische Analogauswertung durch analytische Verfahren und Geräte ersetzt. Die Einstellung und Steuerung der Auswertegeräte erfolgt mikroprozessorgesteuert und die Ergebnisse der stereoskopischen Messungen können digital gespeichert werden. Die bereits Mitte der 1950er Jahre formulierte Bündelausgleichung (BROWN, 1958; SCHMID, 1958) zur gleichzeitigen Orientierung beliebig ausgerichteter Aufnahmen konnte nun mit Hilfe leistungsfähiger Rechner für die Praxis nutzbar gemacht werden (WESTER-EBBINGHAUS, 1978, 1985a). Gleichzeitig werden Verfahren zur Bestimmung der inneren Orientierung durch Simultankalibrierung sowie zur Modellierung und Kompensation systematischer Bildfehler entwickelt (z.B. BROWN, 1971; WESTER-EBBINGHAUS, 1985b), die schließlich dazu führen, dass für photogrammetrische Aufnahmen auch angepasste Mittelformatkameras aus dem Amateurbereich, wie die Hasselblad MK-70 oder die Rolleiflex 6006, verwendet werden können.

Ab Mitte der 1980er Jahre werden die noch immer sehr großen und teuren analytischen Auswertegeräte schließlich durch reine Softwarelösungen ersetzt. Zunächst über Digitalisier-

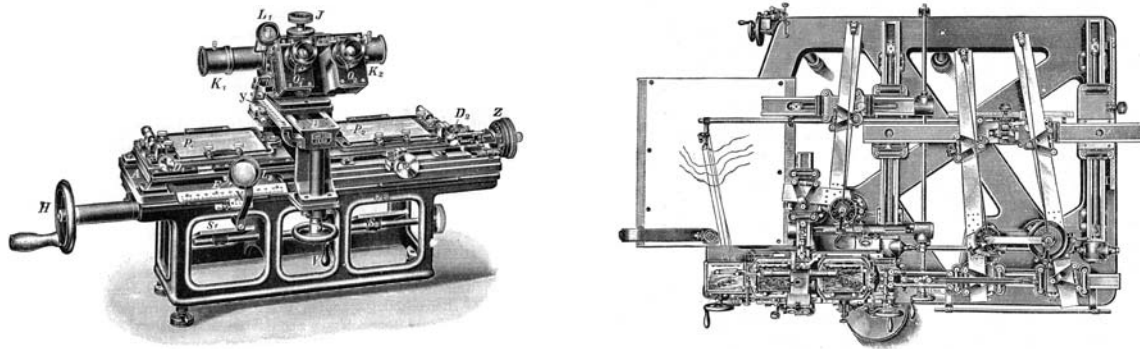


Abbildung 3.3: Stereokomparator, Modell E (links) und Autostereograph, Modell 1914 (aus PULFRICH, 1923)

tische, später dann durch das Scannen der Bilder verlagert sich der Messvorgang im Bild immer mehr hin zur reinen Bildschirmarbeit. Die bisher gerätetechnisch bedingte Trennung in Einbildauswertung/Entzerrung, Stereomessung und Mehrbildauswertung wird mit Einführung digitaler photogrammetrischer Arbeitsplätze aufgehoben, alle Aufgaben lassen sich nun in einem System lösen. Durch die Integration von CAD-Funktionalitäten in die Auswertesoftware können dreidimensionale Objektmodelle generiert werden. Die Entwicklungen auf dem Gebiet der digitalen Bildverarbeitung, vor allem im Bereich der automatischen Bildzuordnung (FÖRSTNER, 1982; GRÜN, 1985), führen schließlich zu einer Automatisierung des stereoskopischen Messvorgangs in den nunmehr digital im Rechner vorliegenden Bildern.

Seit Beginn der 1990er Jahre werden Digitalkameras von verschiedenen Firmen (u.a. Kodak, Sony, Canon, Nikon) serienmäßig hergestellt und kommen für die photogrammetrische Objekterfassung regelmäßig zum Einsatz. Damit kann der gesamte photogrammetrische Prozess, von der Aufnahme über die Orientierung bis hin zur Auswertung, vollständig digitalisiert und zum Teil auch automatisiert werden. Dadurch reduziert sich der gerätetechnische Aufwand im einfachsten Falle auf eine digitale (Spiegelreflex-) Kamera für die Aufnahme, sowie einen Computer für die Orientierung und Auswertung der digitalen Bilder. Mit Hilfe geeigneter Software ist es damit endlich auch Anwendern aus Architektur, Bauingenieurwesen oder Denkmalpflege selbst möglich, photogrammetrische Verfahren für die Objekterfassung und -auswertung einzusetzen. Insbesondere die projektive Entzerrung ebener Objektbereiche und die Montage zu Bildplänen gehört dank anwenderfreundlicher Entzerrungssoftware mittlerweile zum gängigen Erfassungs- und Dokumentationswerkzeug in den genannten Fachbereichen.

Weiterführende Informationen und Literatur zur Geschichte der Nahbereichsphotogrammetrie finden sich, neben den bereits genannten Verweisen, u.a. in (ALBERTZ u. a., 1985; ALBERTZ und WIEDEMANN, 1997; MEIER, 2003; LUHMANN, 2000).

3.2 Grundlagen der analytischen Photogrammetrie

Die in dieser Arbeit näher betrachteten Verfahren der photogrammetrischen Auswertung basieren auf dem klassischen Modell der zentralperspektiven Abbildung. Diese beschreibt die eindeutige Abbildung dreidimensionaler Punkte im Objektraum auf eine Bildebene durch ein

Bündel geradlinig verlaufender Strahlen, die sich in einem Projektionszentrum schneiden. Das zentralperspektive Abbildungsmodell wird in den meisten analogen und digitalen Aufnahmesystemen (Kameras) realisiert und bildet damit die wichtigste Grundlage vieler photogrammetrischer Auswertesysteme. Die mathematischen Zusammenhänge sind, je nach Anwendungsgebiet, in verschiedenen Standardwerken der Photogrammetrie umfassend beschrieben (u.a. in RÜGER u. a., 1987; REGENSBURGER, 1990; KRAUS, 1997; LUHMANN, 2000).

Neben dem zentralperspektiven Abbildungsmodell werden für bestimmte Aufnahmeverfahren davon abweichende geometrische Modelle benötigt (z.B. zylindrische, sphärische oder Fisheye-Abbildungen). Eine umfassende Zusammenstellung dieser Aufnahmeverfahren und der dafür benötigten analytischen Zusammenhänge findet sich in (SCHNEIDER, 2009). Mit den dort entwickelten Ansätzen für eine gemeinsame Auswertung verschiedener Abbildungsmodelle lassen sich die in der vorliegenden Arbeit aufgeführten photogrammetrischen Methoden auch auf andere Aufnahmesysteme übertragen.

Im folgenden sollen nur die für die Arbeit relevanten Zusammenhänge und Begriffe kurz aufgeführt werden. Weiterführende Hinweise finden sich in der entsprechenden Literatur (s.o.).

3.2.1 Koordinatensysteme

Um die mathematischen Beziehungen zwischen Objekt- und Bildraum formulieren zu können, müssen in beiden Räumen Koordinatensysteme definiert werden. In der Regel handelt es sich dabei um rechtwinklige kartesische Koordinatensysteme, in denen ein Punkt durch drei Raumkoordinaten x, y, z festgelegt ist. Davon abweichend können beim Einsatz spezieller Aufnahmesysteme (z.B. Panoramakamera, Laserscanner) oder für die Auswertung bestimmter Objektgeometrien (z.B. Abwicklung, siehe Kap. 3.3.2.3) auch zylindrische oder sphärische Koordinaten verwendet werden.

3.2.1.1 Bildkoordinatensystem

Das Bildkoordinatensystem definiert die Lage eines Bildpunktes im Bildraum. Für zentralprojektive Kameras wird üblicherweise ein räumliches, rechtwinkliges Koordinatensystem mit Ursprung im Projektionszentrum O verwendet. Die Richtungen der x - und y -Achsen der Bildkoordinaten werden in analogen Aufnahmesystemen durch sogenannte Rahmenmarken oder Réseau-Kreuze in der Bildebene festgelegt. Die Koordinatenachsen schneiden einander im Bildmittelpunkt M (Abb. 3.4 links).

In digitalen Aufnahmesystemen wird das Bildkoordinatensystem durch die (rechtwinklige) Anordnung der einzelnen Bildelemente (*Pixel*) in Zeilen und Spalten definiert. Der Ursprung eines *Pixelkoordinatensystems* liegt in der linken oberen Ecke, wobei die Spalten vom Ursprung ausgehend nach rechts und die Zeilen nach unten positiv gezählt werden (Abb. 3.4 rechts). Die Koordinaten eines Bildpunktes z_P, s_P entsprechen hierbei der Zeilen- und Spaltenposition innerhalb der diskreten Bildmatrix. Aus den zunächst ganzzahligen Pixelkoordinaten kann die *Subpixelposition* eines Punktes über die umliegenden Bildelemente interpoliert werden (siehe Kap. 3.3.2.1).

Die z -Achse des Bildkoordinatensystems steht normal auf der Bild- bzw. Sensorebene und entspricht näherungsweise der Richtung der Aufnahmeachse. Die Lage des Projektionszentrums im Bildkoordinatensystem wird durch die Elemente der inneren Orientierung (c_k - Kamerakonstante, x_H, y_H bzw. z_H, s_H - Koordinaten des Bildhauptpunktes, Kap. 3.2.2) festgelegt.

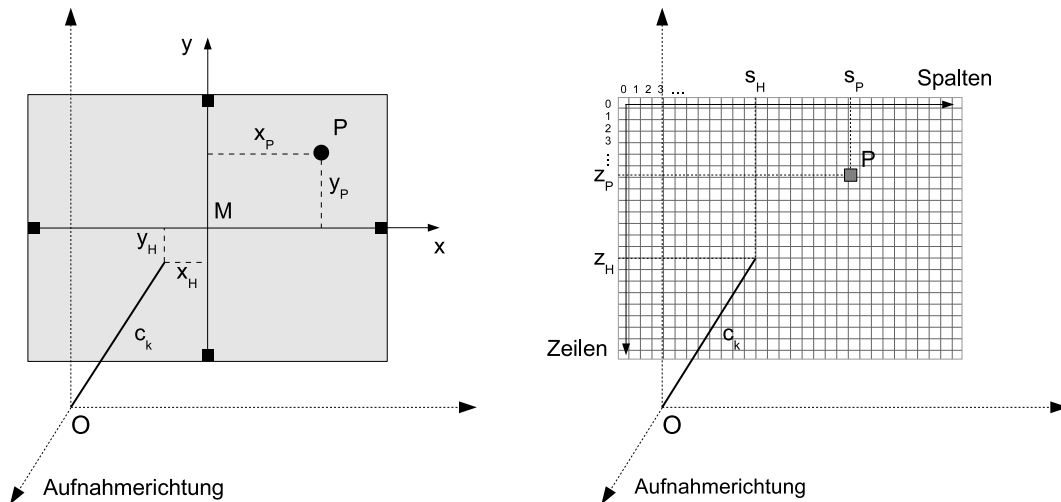


Abbildung 3.4: Definition Bildkoordinatensystem (links) und Pixelkoordinatensystem

3.2.1.2 Modellkoordinatensystem

Die Orientierung eines Bildpaares bzw. eines Bildverbandes kann zunächst ohne Passinformationen im Objektraum erfolgen (relative Orientierung, Kap. 3.2.3). Die Orientierungen der Bilder und die Objektkoordinaten beziehen sich dann auf ein lokales Modellkoordinatensystem, dessen Ursprung in der Regel im Projektionszentrum des ersten Bildes liegt und dessen Maßstab in bezug auf das Objektkoordinatensystem unbekannt ist. Das Modellkoordinatensystem kann über identische Geometrien in ein Objektkoordinatensystem transformiert werden. Im einfachsten Fall reicht hierfür eine Streckeninformation im Objektraum um das Modellsystem entsprechend zu skalieren. Damit kann bereits eine maßstabsgerechte Auswertung in einem Stereobildpaar oder Mehrbildverband durchgeführt werden. Die vollständige Überführung des Modellkoordinatensystems in das übergeordnete Objektkoordinatensystem erfolgt über eine räumliche Ähnlichkeitstransformation mit Hilfe von 3 identischen Passpunkten in beiden Systemen. Dabei werden 3 Translationen, 3 Rotationen sowie ein Maßstabsfaktor bestimmt.

3.2.1.3 Objektkoordinatensystem

Die Lage von Punkten im Objektraum sowie die Position und Ausrichtung von Aufnahmesystemen wird über ein dreidimensionales kartesisches Objektkoordinatensystem definiert. In der Nahbereichs- und Architekturphotogrammetrie werden meist lokale, auf das konkrete Objekt bezogene Koordinatensysteme gewählt. Entsprechend der Objektform können dabei auch Zylinder-, Kugel- oder andere Koordinatensysteme definiert werden.

Aus mathematischer Sicht ist die Lage des Systems bezüglich des Objektes praktisch beliebig. Um jedoch anschauliche Objektinformationen zu erhalten, richtet sich die Definition eines Objektsystems vor allem nach den Bedürfnissen und Anforderungen bei der Auswertung. So verläuft in der Architekturphotogrammetrie die X-Achse (Rechtswert) des Objektsystems häufig horizontal in Fassadenrichtung, die Z-Achse (Höhe) steht rechtwinklig dazu vertikal und die Y-Achse (Hochwert bzw. Tiefe) ergänzt das System zu einem orthogonalen Dreibein (siehe Abb. 3.5).

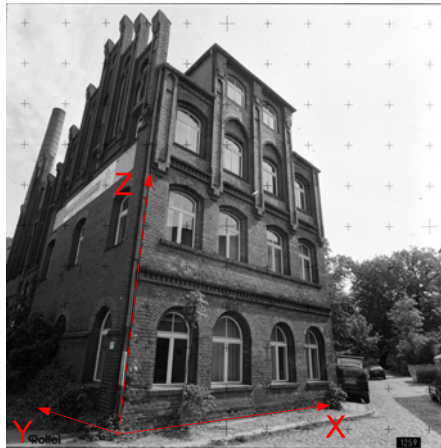


Abbildung 3.5: Definition eines Objektkoordinatensystems

3.2.2 Abbildungsmodell

Das Abbildungsmodell beschreibt den funktionalen Zusammenhang zwischen Objekt- bzw. Modellkoordinaten und den gemessenen Bildkoordinaten. Dabei muss zum einen die Geometrie des Aufnahmesystems über die innere Orientierung bzw. die Kameraparameter und zum anderen die äußere Orientierung des Aufnahmesystems bezüglich des Objektkoordinatensystems berücksichtigt werden.

3.2.2.1 Innere Orientierung

Die Elemente der inneren Orientierung definieren die Lage des Projektionszentrums im kamerafesten Bildkoordinatensystem und ermöglichen damit die Rekonstruktion des Aufnahmestrahlenbündels aus den gemessenen Bildkoordinaten. Die Kamerakonstante c_k ist der lotrechte Abstand des Projektionszentrums von der Bildebene. Sie ist eine reine Rechengröße und entspricht näherungsweise der Brennweite. Der orthogonale Durchstoßpunkt des Projektionszentrums durch die Bildebene ist der Bildhauptpunkt H mit den Bildkoordinaten x_H, y_H (Abb. 3.4).

Bei einer optischen Abbildung durch ein Objektiv kommt es zu Abweichungen vom mathematischen Modell der Zentralperspektive. Die Daten der inneren Orientierung müssen daher um zusätzliche Verzeichnungsparameter ergänzt werden.

Radial-symmetrische Verzeichnung Aufgrund von Brechungsänderungen innerhalb des Linsensystems kommt es in Abhängigkeit vom Bildradius r , d.h. vom jeweiligen Abstand

zum Bildmittelpunkt, zu einem radial-symmetrischen Lageversatz Δr_{rad} der Bildpunkte gegenüber der idealen zentralprojektiven Abbildung. Dieser Lageversatz kann über einen Polynomansatz nach (BROWN, 1971) modelliert werden:

$$\Delta r_{rad} = A_1 \cdot r^3 + A_2 \cdot r^5 + A_3 \cdot r^7 - r(A_1 \cdot r_0^2 + A_2 \cdot r_0^4 + A_3 \cdot r_0^6) \quad (3.1)$$

r_0 wird dabei so gewählt, dass die minimalen und maximalen Verzeichnungswerte im Bild etwa gleich groß sind.

Die Komponenten von Δr_{rad} in Bezug auf die Koordinatenrichtungen ergeben sich zu:

$$\Delta x_{rad} = x \cdot \frac{\Delta r_{rad}}{r} \quad \Delta y_{rad} = y \cdot \frac{\Delta r_{rad}}{r} \quad (3.2)$$

Radial-asymmetrische und tangentiale Verzeichnung Zentrierungsfehler der Linsen innerhalb des Objektivs führen zu radial-asymmetrischen und tangentialen Lageversätzen (Dezentrierverzeichnung), die über folgenden Ansatz erfasst werden können (BROWN, 1971):

$$\Delta x_{dez} = B_1 \cdot (r^2 + 2x^2) + 2B_2 \cdot x \cdot y \quad \Delta y_{dez} = B_2 \cdot (r^2 + 2y^2) + 2B_1 \cdot x \cdot y \quad (3.3)$$

Für hochwertige Objektive insbesondere in Mess- und Teilmesskameras ist der Einfluss dieser Verzeichnungsanteile deutlich geringer als der durch die radial-symmetrische Verzeichnung hervorgerufene Lageversatz. Insbesondere bei der Verwendung (einfacher) Amateurkameras können die Parameter der radial-asymmetrischen und tangentialen Verzeichnung in der Regel jedoch nicht vernachlässigt werden und sollten im Zuge der Kamerakalibrierung mitbestimmt werden.

Affinität und Scherung In digitalen Aufnahmesystemen kann es durch eine ungleichmäßige Anordnung der einzelnen Sensorelemente zu Abweichungen vom quadratisch definierten Pixelsystem digitaler Bilder kommen (Abb. 3.4). Insbesondere kann dieser Effekt beim Übergang vom Pixelkoordinatensystem in ein metrisches Bildkoordinatensystem auftreten, wenn das Seitenverhältnis des Sensors nicht genau bekannt ist. Affinität und Scherung lassen sich durch folgenden Ansatz modellieren (LUHMANN, 2000):

$$\Delta x_{aff} = C_1 \cdot x + C_2 \cdot y \quad \Delta y_{aff} = 0 \quad (3.4)$$

Mit den Daten der inneren Orientierung sowie den zusätzlichen Parametern zur Modellierung von Abbildungsfehlern erhält man schließlich den auf das Projektionszentrum bezogenen Abbildungsvektor für einen Punkt P im Bildraum:

$$\mathbf{x}' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ -c_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_P - x_H + \Delta x \\ y_P - y_H + \Delta y \\ -c_k \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

mit

$$\Delta x = \Delta x_{rad} + \Delta x_{dez} + \Delta x_{aff} \quad \text{und} \quad \Delta y = \Delta y_{rad} + \Delta y_{dez} + \Delta y_{aff} \quad (3.6)$$

3.2.2.2 Äußere Orientierung

Die Lage und Ausrichtung des Aufnahmesystems im übergeordneten Objektkoordinatensystem wird durch die sechs Parameter der äußeren Orientierung beschrieben:

- die Koordinaten des Projektionszentrums X_0, Y_0, Z_0 im Objektraum (drei Translationen) sowie
- drei Drehwinkel φ, ω und κ zur Festlegung der räumlichen Ausrichtung des Bildkoordinatensystems (drei Rotationen).

Abhängig vom jeweiligen Anwendungsgebiet sowie der konkreten Umsetzung in verschiedenen Auswertesystemen existieren unterschiedliche Konventionen zur Definition der Rotationswinkel und der Rotationsabfolgen. Zur Vermeidung von Singularitäten bei der Verwendung trigonometrischer Winkelfunktionen wird zwischen Senkrechtaufnahmen, z.B. bei der Auswertung von Luftbildern, und terrestrischen Aufnahmen mit meist horizontaler Aufnahmerichtung unterschieden. Für beide Anwendungsfälle werden jeweils unterschiedliche Drehreihenfolgen festgelegt. Darüber hinaus ist es möglich, die Drehmatrix über eine einheitliche Parametrisierung mit algebraischen Funktionen (Quaternionen) zu beschreiben.

Terrestrischer Fall In der Architektur- und Nahbereichsphotogrammetrie entspricht φ (Aufnahmerichtung) der Primärdrehung um die feste Z-Achse, ω (Bildneigung) der Sekundärdrehung um die mitbewegte X-Achse und κ (Kantung) der Tertiärdrehung um die ebenfalls mitgedrehte Y-Achse (Abb. 3.6).

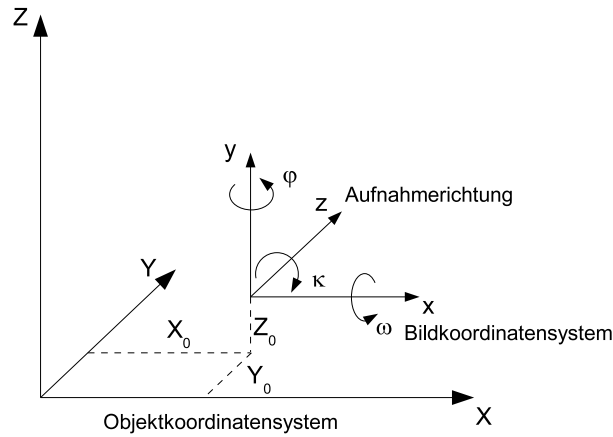


Abbildung 3.6: Äußere Orientierung - terrestrischer Fall

Aus dieser Festlegung für die Drehungen ergeben sich folgende Rotationsmatrizen (REGENSBURGER, 1990):

$$\mathbf{R}_\varphi = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_\kappa = \begin{bmatrix} \cos \kappa & 0 & \sin \kappa \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \kappa & 0 & \cos \kappa \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Mit der festgelegten Rotationsabfolge $\varphi\omega\kappa$ erhält man die Rotationsmatrix \mathbf{R} für die Gesamtdrehung zu:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_\varphi \cdot \mathbf{R}_\omega \cdot \mathbf{R}_\kappa = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

mit den Elementen r_{ij} :

$$\begin{aligned} r_{11} &= \cos \varphi \cos \kappa - \sin \varphi \sin \omega \sin \kappa \\ r_{12} &= -\sin \varphi \cos \omega \\ r_{13} &= \cos \varphi \sin \kappa + \sin \varphi \sin \omega \cos \kappa \\ r_{21} &= \sin \varphi \cos \kappa + \cos \varphi \sin \omega \sin \kappa \\ r_{22} &= \cos \varphi \cos \omega \\ r_{23} &= \sin \varphi \sin \kappa - \cos \varphi \sin \omega \cos \kappa \\ r_{31} &= -\cos \omega \sin \kappa \\ r_{32} &= \sin \omega \\ r_{33} &= \cos \omega \cos \kappa \end{aligned} \quad (3.9)$$

Luftbildfall Bei einer dem Luftbildfall entsprechenden Aufnahmesituation (Senkrechtaufnahme) werden die Rotationen gewöhnlich anders definiert. Hier ist φ (Längsneigung) die Primärdrehung um die Y-Achse, ω (Querneigung) die Sekundärdrehung um die mitgedrehte X-Achse und κ (Kantung) die Tertiärdrehung um die ebenfalls mitgedrehte Z-Achse (Abb. 3.7).

Die Rotationsmatrizen für den Luftbildfall lauten nun (RÜGER u. a., 1987):

$$\mathbf{R}_\varphi = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_\kappa = \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Die Elemente r_{ij} der Rotationsmatrix \mathbf{R} für die Gesamtdrehung $\varphi\omega\kappa$ lauten damit:

$$\begin{aligned} r_{11} &= \cos \varphi \cos \kappa + \sin \varphi \sin \omega \sin \kappa \\ r_{12} &= -\cos \varphi \sin \kappa + \sin \varphi \sin \omega \cos \kappa \\ r_{13} &= \sin \varphi \cos \omega \\ r_{21} &= \cos \omega \sin \kappa \\ r_{22} &= \cos \omega \cos \kappa \\ r_{23} &= -\sin \omega \\ r_{31} &= -\sin \varphi \cos \kappa + \cos \varphi \sin \omega \sin \kappa \\ r_{32} &= \sin \varphi \sin \kappa + \cos \varphi \sin \omega \cos \kappa \\ r_{33} &= \cos \varphi \cos \omega \end{aligned} \quad (3.11)$$

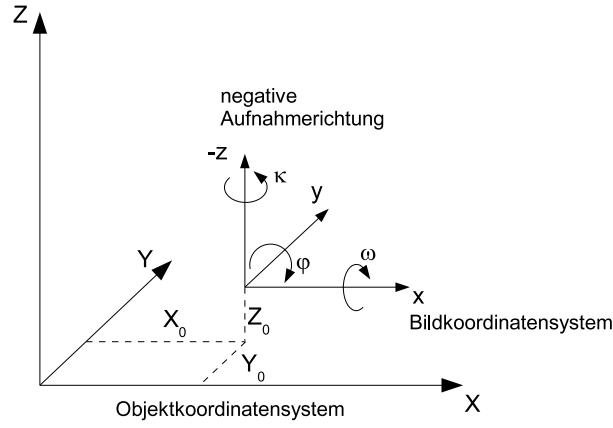


Abbildung 3.7: Äußere Orientierung - Luftbildfall

Eine alternative Darstellung ergibt sich durch Vertauschen der Drehreihenfolge mit ω als Primärdrehung, φ als Sekundärdrehung und κ als Tertiärdrehung (ALBERTZ und KREILING, 1989):

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_\omega \cdot \mathbf{R}_\varphi \cdot \mathbf{R}_\kappa = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

mit den Elementen r_{ij} :

$$\begin{aligned} r_{11} &= \cos \varphi \cos \kappa \\ r_{12} &= -\cos \varphi \sin \kappa \\ r_{13} &= \sin \varphi \\ r_{21} &= \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa \\ r_{22} &= \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa \\ r_{23} &= -\sin \omega \cos \varphi \\ r_{31} &= \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa \\ r_{32} &= \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa \\ r_{33} &= \cos \omega \cos \varphi \end{aligned} \quad (3.13)$$

Die jeweils verwendeten Rotationswinkel und deren Drehreihenfolge sind insbesondere beim Datenaustausch mit anderen Auswertesystemen zu beachten. Beim Import und Export von Orientierungsdaten muss die zugrundeliegende Definition bekannt sein und mit übergeben werden.

Drehmatrix über Quaternionen Die bei der Verwendung trigonometrischer Funktionen auftretenden Mehrdeutigkeiten und Singularitäten können durch Darstellung der Drehungen über algebraische Funktionen vermieden werden (HINSKEN, 1987). Die Drehmatrix wird hierbei als Funktion von vier Parametern beschrieben:

$$\mathbf{R}^T = \begin{bmatrix} d^2 + a^2 - b^2 - c^2 & 2(ab - cd) & 2(ac + bd) \\ 2(ab + cd) & d^2 - a^2 + b^2 - c^2 & 2(bc - ad) \\ 2(ac - bd) & 2(bc + ad) & d^2 - a^2 - b^2 + c^2 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Aus den Parametern $a...d$ lassen sich mit Hilfe von Gleichung 3.13 die gewohnten Drehwinkel berechnen:

$$\begin{aligned}
\cos \varphi \cdot \sin \kappa &= 2(dc - ab) \\
\cos \varphi \cdot \cos \kappa &= d^2 + a^2 - b^2 - c^2 \\
\cos \varphi \cdot \sin \omega &= 2(da - bc) \\
\cos \varphi \cdot \cos \omega &= d^2 - a^2 - b^2 + c^2 \\
\sin \omega &= 2(ac + bd)
\end{aligned} \tag{3.15}$$

Da bei der Darstellung der Drehmatrix keine trigonometrischen Funktionen verwendet werden, vereinfacht sich die Aufstellung und Berechnung der Koeffizienten bei der Ausgleichsrechnung und es ergibt sich ein schnelleres Konvergenzverhalten.

3.2.2.3 Kollinearitätsgleichungen

Mit den Daten der inneren und äußeren Orientierung lässt sich der funktionale Zusammenhang zwischen den Koordinaten eines Punktes P im Objektraum und den zugehörigen Koordinaten im Bildraum formulieren. Die Objektkoordinaten $\mathbf{X_P}$ des Punktes P lassen sich aus den Koordinaten des Projektionszentrums $\mathbf{X_0}$ und dem mit Hilfe der Drehmatrix \mathbf{R} in das Objektkoordinatensystem transformierten Bildvektor $\mathbf{x_P}$ (Gleichung 3.5) herleiten:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X_0} + m \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{x_P} \tag{3.16}$$

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + m \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ -c_k \end{bmatrix}$$

Der Maßstabsfaktor m bestimmt die Länge des Vektors vom Projektionszentrum zum jeweiligen Objektpunkt und hat damit für jeden Punkt P gegebenenfalls einen anderen Wert. Aus den Bildkoordinaten in einem einzelnen orientierten Bild lassen sich daher zunächst nur die *Richtungen* zu den Objektpunkten festlegen. Die absolute Position ergibt sich durch den Schnitt eines Strahls mit einer weiteren bekannten Geometrie im Objektraum. Bei einer Stereo- oder Mehrbildauswertung sind dies die Raumstrahlen aus den orientierten Bildern, bei der Einbildauswertung ergeben sich die Koordinaten aus dem Schnitt mit der bekannten Oberflächengeometrie (z.B. Ebene, Zylinder, digitales Oberflächenmodell).

Durch Umkehrung von Gleichung 3.16 lassen sich die Bildkoordinaten als Funktion der Objektkoordinaten darstellen. Zusätzlich wird der Bildvektor um die Daten der inneren Orientierung entsprechend Gleichung 3.5 erweitert:

$$\begin{bmatrix} x_P - x_H - \Delta x \\ y_P - y_H - \Delta y \\ -c_k \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \tag{3.17}$$

Werden die beiden ersten Gleichungen aus 3.17 durch die dritte dividiert und entsprechend umgestellt, erhält man schließlich die Kollinearitätsgleichungen in der bekannten Form (RÜGER u. a., 1987):

$$x = x_H - c_k \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x$$

(3.18)

$$y = y_H - c_k \cdot \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y$$

Diese Gleichungen beschreiben für eine zentralperspektive Kamera den Abbildungsvorgang eines Objektpunktes P in die Bildebene als Funktion der inneren und äußeren Orientierung. Sie bilden damit die Grundlage für zahlreiche Verfahren der analytischen Ein- und Mehrbildauswertung.

3.2.3 Orientierung eines Stereobildpaares

Unter einem Stereobildpaar werden im folgenden zwei zusammengehörige Aufnahmen mit genähert parallelen Aufnahmerrichtungen verstanden, die einen Objektbereich mit einer Überlappung von mindestens 60% abbilden. Bei der Orientierung von Stereobildpaaren sollen für beide Bilder die Parameter der äußeren Orientierung bestimmt werden, die Daten der inneren Orientierung der beteiligten Kamera(s) werden als bekannt vorausgesetzt. Hierfür existieren unterschiedliche Orientierungsansätze:

- getrennte Orientierung: die Daten der äußeren Orientierung beider Aufnahmen werden getrennt durch räumlichen Rückwärtsschnitt bestimmt. In jedem Bild müssen hierfür mindestens drei Passpunkte mit bekannten Objektkoordinaten gemessen werden. Die geometrischen Zusammenhänge bei der stereoskopischen Abbildung eines gemeinsamen Objektbereiches in beiden Aufnahmen bleiben unberücksichtigt. Aussagen zur Qualität der Orientierung im Stereomodell sind nicht direkt möglich sondern lassen sich erst über die bei der stereoskopischen Auswertung auftretenden Fehler bei der Berechnung von Objektpunkten treffen.
- Doppelbildeinschaltung: über eine Bündelblockausgleichung (siehe Kap. 3.2.6) mit nur zwei Bildern werden die Orientierungsdaten beider Bilder gemeinsam in einem Schritt berechnet. Neben Verknüpfungspunkten werden hierfür die Bildkoordinaten von Passpunkten im Objektraum bestimmt. Die Qualität der Orientierung lässt sich über die in beiden Bildern gemessenen, homologen Punkte direkt beurteilen.
- relative und absolute Orientierung: die Orientierung der Bilder erfolgt zweistufig. Im ersten Schritt werden über homologe Bildpunkte Translation und Rotation der beiden Bilder zueinander bestimmt (relative Orientierung), Passinformationen im Objektraum werden hierfür nicht benötigt. Die Orientierungsdaten beziehen sich dabei auf ein lokales Modellkoordinatensystem (siehe Kap. 3.2.1), dessen Maßstab und Orientierung im Objektsystem zunächst unbekannt sind. Im zweiten Schritt, der absoluten Orientierung, erfolgt mit Hilfe von Passinformationen eine Transformation in ein übergeordnetes Objektkoordinatensystem.

Der zweistufige Orientierungsprozess über relative und absolute Orientierung ist für die Anwendung in der Architektur- und Nahbereichsphotogrammetrie von besonderer Bedeutung. Die Messung homologer Punkte für die relative Orientierung kann vollständig automatisiert werden, da keine Objektpunkte explizit angemessen werden müssen. Für eine maßstäbliche Auswertung in einem Stereomodell werden anschließend nur minimale Objektinformationen für die Skalierung des Modellkoordinatensystems der relativen Orientierung benötigt (z.B.

eine Strecke). Weitere Passinformationen am Objekt müssen nicht bestimmt werden. Die Orientierung eines Stereobildpaares und die Gewinnung dreidimensionaler Objektinformationen kann damit von den Anwendern selbständig durchgeführt werden.

Im folgenden wird daher die Berechnung der relativen und absoluten Orientierung kurz beschrieben.

3.2.3.1 Relative Orientierung

Die relative Orientierung eines Bildpaares lässt sich durch 5 der insgesamt 12 Bestimmungselemente der äußeren Orientierung zweier Bilder festlegen. Zur Bestimmung dieser 5 Freiheitsgrade sind mindestens 5 homologe Punkte (Verknüpfungspunkte) in den Bildern zu messen. Bei der Berechnung der Orientierungselemente werden zwei Verfahren unterschieden:

- **Folgebildanschluss:** das Modellkoordinatensystem wird mit seinem Ursprung in das Projektionszentrum O_1 des linken Bildes gelegt und parallel zu den Achsen des Bildkoordinatensystems ausgerichtet. Die Elemente der äußeren Orientierung des linken Bildes im Modellkoordinatensystem sind damit festgelegt ($\varphi_1 = \omega_1 = \kappa_1 = 0$; $x_{01} = y_{01} = z_{01} = 0$), so dass die fünf Freiheitsgrade auf die Orientierung des rechten Bildes entfallen. Die Translation des rechten Bildes in x-Richtung entspricht der Basiskomponente b_x und wird zur Festlegung des Modellmaßstabes auf einen beliebigen Wert gesetzt (z.B. $x_{02} = b_x = 1$). Die verbleibenden Elemente der Orientierung des rechten Bildes (2 Translationen $y_{02} = b_y$, $z_{02} = b_z$ und 3 Rotationen $\varphi_2, \omega_2, \kappa_2$) sind zu bestimmen.
- **Orientierung unabhängiger Bildpaare** (Abb. 3.8): das Modellkoordinatensystem wird mit dem Ursprung ebenfalls in das Projektionszentrum O_1 des linken Bildes gelegt, die x-Achse verläuft jedoch in Basisrichtung durch das Projektionszentrum O_2 des rechten Bildes. Mit der Festlegung des Modellmaßstabes über die Basiskomponente b_x sind damit die Koordinaten beider Projektionszentren im Modellsystem bekannt ($x_{01} = y_{01} = z_{01} = 0$; $x_{02} = b_x = 1$, $y_{02} = z_{02} = 0$). Die fünf Freiheitsgrade entfallen auf die Bestimmung der Rotationswinkel für beide Bilder, wobei eine der beiden Rotationen um die x-Achse festgehalten werden kann (z.B. $\omega_2 = 0$). Durch die relative Orientierung sind die verbleibenden Rotationswinkel ($\varphi_1, \omega_1, \kappa_1$; φ_2, κ_2) zu bestimmen.

Die relative Orientierung unabhängiger Bildpaare entspricht den geometrischen Verhältnissen in terrestrischen Stereoaufnahmesystemen. Auch hier definiert die Basis zwischen beiden Aufnahmestandorten das feste Bezugssystem für die Kameraorientierung und nicht die Ausrichtung eines der beiden Bildkoordinatensysteme. Im folgenden soll daher nur auf dieses Verfahren eingegangen werden, die Berechnung für den Folgebildanschluss findet sich u.a. in (ALBERTZ und KREILING, 1989; LUHMANN, 2000).

Grundlage für die Berechnung der relativen Orientierung ist die sog. *Koplanaritätsbedingung*, nach der in einem Stereobildpaar der Objektpunkt P sowie die beiden Projektionszentren O_1 und O_2 in einer Ebene liegen müssen. Mit den drei Vektoren $\mathbf{r}' = \overline{O_1P}$, $\mathbf{r}'' = \overline{O_2P}$ und $\mathbf{b} = \overline{O_1O_2}$ im Modellkoordinatensystem lässt sich diese Bedingung über das Spatprodukt, d.h. das Volumen, das diese drei Vektoren aufspannen, ausdrücken:

$$\Delta = (\mathbf{b} \times \mathbf{r}') \cdot \mathbf{r}'' = 0 \quad (3.19)$$

Die Qualität der relativen Orientierung lässt sich über die in das Modellkoordinatensystem transformierten Vektoren der Bildkoordinaten \mathbf{r}' und \mathbf{r}'' beurteilen. Die Differenzen der \bar{y} -Komponenten aus beiden Vektoren werden als y-Parallaxe bezeichnet und sind ein Maß für die erreichte Genauigkeit an homologen Punkten im Bildraum:

$$py = \bar{y}'' - \bar{y}' \quad \text{y-Parallaxe} \quad (3.25)$$

Mit den Parametern der relativen Orientierung können aus den gemessenen Bildkoordinaten homologer Punkte die zugehörigen Modellkoordinaten über einen räumlichen Vorwärtsschnitt (Kap. 3.2.4) berechnet werden. Die Modellkoordinaten beziehen sich dabei auf den durch b_x definierten Modellmaßstab.

3.2.3.2 Epipolargeometrie

Aus Abbildung 3.8 wird deutlich, dass die Abbildungsstrahlen \mathbf{r}' und \mathbf{r}'' zusammen mit der Basis \mathbf{b} eine Ebene aufspannen. Diese sogenannte Epipolar- oder Kernebene schneidet die Bildebenen in den Geraden e' und e'' , die als *Epipolar-* oder *Kernlinien* bezeichnet werden (LUHMANN, 2000).

Besondere Bedeutung hat die Epipolarlinie vor allem bei der Zuordnung homologer Punkte bei der automatisierten Bildauswertung (siehe Kap. 5). Bei korrekter relativer Orientierung befindet sich ein zu P' korrespondierender Bildpunkt P'' im rechten Bild entlang der Epipolarlinie e'' . Damit lässt sich der Suchraum für korrespondierende Bildpunkte beim automatisierten Zuordnungsprozess stark einschränken. Aufgrund verbleibender Orientierungsfehler wird die Epipolarlinie dabei in der Regel zu einem schmalen Suchstreifen entlang der berechneten Linie aufgeweitet.



Abbildung 3.9: Epipolarlinien einer Vier-Kamera-Konfiguration

Abbildung 3.9 zeigt die Epipolarlinien einer erweiterten Vier-Kamera-Konfiguration (siehe Kap. 5.2.2) in stereoskopischer Anaglyphendarstellung.

3.2.3.3 Absolute Orientierung

Die Modellkoordinaten der relativen Orientierung lassen sich analog zu Gleichung 3.16 über eine räumliche Ähnlichkeitstransformation mit 3 Translationen \mathbf{X}_0 , 3 Rotationen $\mathbf{R}(\xi \eta \zeta)$ und einem Maßstabsfaktor m in das System der Objektkoordinaten überführen:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + m \cdot \mathbf{R}(\xi \eta \zeta) \cdot \mathbf{x} \quad (3.26)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + m \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Zur Bestimmung der insgesamt 7 Parameter der absoluten Orientierung werden die Koordinaten von mindestens 3 räumlich verteilten Passpunkten im Modell- und Objektkoordinatensystem benötigt. Aus Gleichung 3.26 ergeben sich für jeden Passpunkt bis zu drei Gleichungen, aus denen die linearisierten Verbesserungsgleichungen für eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen aufgestellt werden können:

$$\begin{aligned} X + v_x &= dX_0 + \frac{\partial X}{\partial m} dm + \frac{\partial X}{\partial \xi} d\xi + \frac{\partial X}{\partial \eta} d\eta + \frac{\partial X}{\partial \zeta} d\zeta + X^0 \\ Y + v_y &= dY_0 + \frac{\partial Y}{\partial m} dm + \frac{\partial Y}{\partial \xi} d\xi + \frac{\partial Y}{\partial \eta} d\eta + \frac{\partial Y}{\partial \zeta} d\zeta + Y^0 \\ Z + v_z &= dZ_0 + \frac{\partial Z}{\partial m} dm + \frac{\partial Z}{\partial \xi} d\xi + \frac{\partial Z}{\partial \eta} d\eta + \frac{\partial Z}{\partial \zeta} d\zeta + Z^0 \end{aligned} \quad (3.27)$$

Mit Hilfe der Parameter der absoluten Orientierung lassen sich aus den Parametern der relativen Orientierung die äußeren Orientierungen für beide Bilder berechnen. Die Objektkoordinaten des Projektionszentrums O_1 des linken Bildes entsprechen laut Definition den Ursprungskoordinaten des Modellsystems:

$$\mathbf{X}_{O_1} = \mathbf{X}_0 \quad (3.28)$$

Durch eine Transformation der Basiskomponenten \mathbf{b} entsprechend Gleichung 3.26 lassen sich die Objektkoordinaten des rechten Projektionszentrums O_2 berechnen:

$$\mathbf{X}_{O_2} = \mathbf{X}_0 + m \cdot \mathbf{R}(\xi \eta \zeta) \cdot \mathbf{b} \quad (3.29)$$

Die Rotationsmatrizen der äußeren Orientierung erhält man schließlich durch die Multiplikation der Rotationsmatrizen der absoluten mit denen der relativen Orientierung:

$$\mathbf{R}_1 = \mathbf{R}(\xi \eta \zeta) \cdot \mathbf{R}' \quad \text{und} \quad \mathbf{R}_2 = \mathbf{R}(\xi \eta \zeta) \cdot \mathbf{R}'' \quad (3.30)$$

3.2.4 Räumlicher Vorwärtsschnitt

Über einen räumlichen Vorwärtsschnitt lassen sich aus den Bildkoordinaten homologer Punkte in zwei oder mehr Bildern die zugehörigen Modell- bzw. Objektkoordinaten berechnen. Voraussetzung dafür ist, dass für die beteiligten Bilder die Daten der inneren und äußeren Orientierung vorliegen. Für die in Kapitel 3.2.3 vorgestellte zweistufige Orientierung eines

Stereobildpaares kann eine Koordinatenberechnung auch auf der Grundlage einer relativen Orientierung mit bekannter innerer Orientierung beider Aufnahmen erfolgen. Die ermittelten Koordinaten beziehen sich dann zunächst auf das Modellkoordinatensystem.

Die Berechnung der Objektkoordinaten erfolgt über eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen. Den funktionalen Zusammenhang zwischen den gemessenen Bildkoordinaten und den gesuchten Objektkoordinaten liefern die Kollinearitätsgleichungen 3.18. Daraus ergeben sich für jeden gemessenen Bildpunkt zwei linearisierte Verbesserungsgleichungen der Form:

$$\begin{aligned}x + v_x &= \frac{\partial x}{\partial X}dX + \frac{\partial x}{\partial Y}dY + \frac{\partial x}{\partial Z}dZ + x^0 \\y + v_y &= \frac{\partial y}{\partial X}dX + \frac{\partial y}{\partial Y}dY + \frac{\partial y}{\partial Z}dZ + y^0\end{aligned}\tag{3.31}$$

mit den aus Näherungswerten bestimmten Bildkoordinaten x^0 und y^0 .

Die unbekannten Objektkoordinaten \mathbf{x} werden iterativ entsprechend dem bekannten Rechenschema für eine Ausgleichung nach kleinsten Quadraten bestimmt (siehe z.B. HÖPCKE, 1980):

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}} &= (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \cdot (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}) && \text{Unbekanntenzuschläge} \\ \mathbf{v} &= \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l} && \text{Vektor der Verbesserungen} \\ \hat{\sigma}_0 &= \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{n - u}} && \text{Standardabweichung}\end{aligned}\tag{3.32}$$

Der Beobachtungsvektor \mathbf{l} ergibt sich aus der Differenz der gemessenen Bildkoordinaten \mathbf{x} und den aus Näherungswerten bestimmten Bildkoordinaten \mathbf{x}^0 . Die Designmatrix \mathbf{A} enthält die partiellen Ableitungen nach den unbekannten Objektkoordinaten entsprechend Gleichung 3.31. Die Genauigkeit der Bildkoordinaten hängt u.a. vom eingesetztem Messverfahren (manuell, automatisch), der (Wieder-) Erkennbarkeit der Punkte in den Bildern (markierte oder nicht markierte Punkte) und der Bildqualität (digital, analog) ab und kann über entsprechende Gewichte in der Matrix \mathbf{P} berücksichtigt werden.

Die erreichte Genauigkeit der Objektpunktberechnung lässt sich aus der Kofaktorenmatrix $\mathbf{Q} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1}$ der Unbekannten abschätzen (HÖPCKE, 1980). Danach ergeben sich die Standardabweichungen der Punktkoordinaten aus den Elementen der Hauptdiagonalen von \mathbf{Q} zu:

$$\begin{aligned}\hat{\sigma}_X &= \hat{\sigma}_0 \cdot \sqrt{q_{XX}} \\ \hat{\sigma}_Y &= \hat{\sigma}_0 \cdot \sqrt{q_{YY}} \\ \hat{\sigma}_Z &= \hat{\sigma}_0 \cdot \sqrt{q_{ZZ}}\end{aligned}\tag{3.33}$$

und der daraus abgeleitete mittlere Punktfehler zu:

$$\hat{\sigma}_P = \sqrt{\hat{\sigma}_X^2 + \hat{\sigma}_Y^2 + \hat{\sigma}_Z^2}\tag{3.34}$$

3.2.5 Räumlicher Rückwärtsschnitt

Der räumliche Rückwärtsschnitt kann als Sonderfall der Bündelblockausgleichung (Kap. 3.2.6) für eine einzelne Aufnahme angesehen werden. Ausgehend von den Kollinearitätsgleichungen 3.18 wird dabei die äußere Orientierung eines Einzelbildes aus den gemessenen Bildkoordinaten von mindestens drei Objektpasspunkten berechnet. Die Verbesserungsgleichungen entsprechen den Gleichungen 3.35, die Berechnung erfolgt analog durch Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen.

Zusätzlich lassen sich auch beim räumlichen Rückwärtsschnitt die Parameter der inneren Orientierung $(c_k, x_H, y_H, \Delta x, \Delta y)$ mit bestimmen. Hierfür werden jedoch zusätzliche Passpunkte mit ausreichender räumlicher Verteilung im Objektraum benötigt. Voraussetzung für eine zuverlässige Bestimmung der inneren und äußeren Orientierung ist zudem eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Passpunkte über den gesamten Bildbereich. Die Qualität des Rückwärtsschnittes lässt sich mit Hilfe der statistischen Größen der Ausgleichungsrechnung beurteilen.

3.2.6 Bündelblockausgleichung

Die Bündelblockausgleichung stellt die allgemeinste Form der gemeinsamen Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen dar. Das mathematische Modell unterliegt dabei keinen Einschränkungen hinsichtlich der Aufnahmedisposition und Anzahl der beteiligten Bilder bzw. Kameras. Die unbekannten Größen werden unter Einbeziehung aller Beobachtungen simultan in einem Berechnungsvorgang bestimmt. Gleichzeitig lassen sich zahlreiche statistische Größen zur Beurteilung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Ausgleichungssystems mit berechnen. Damit ist die Bündelblockausgleichung das flexibelste und genaueste Verfahren der analytischen Bildauswertung.

Das funktionale Modell basiert wiederum auf den in Kapitel 3.2.2 vorgestellten Kollinearitätsgleichungen. Als Beobachtungen gehen dabei die gemessenen Bildkoordinaten (x_i, y_i) homologer Punkte ein. Zur Festlegung der Lage und Orientierung des Bildverbandes in einem übergeordneten Koordinatensystem sowie zur Stabilisierung des Strahlenbündels können zusätzliche Informationen, wie Objektkoordinaten, Winkel, Strecken, Geraden oder Ebenen, berücksichtigt werden.

Als Unbekannte lassen sich im Rahmen der Ausgleichung die Koordinaten von Neupunkten im Objektraum (X_i, Y_i, Z_i) , die Parameter der äußeren Orientierung aller beteiligten Aufnahmen $(X_{0_j}, Y_{0_j}, Z_{0_j}, \varphi_j, \omega_j, \kappa_j)$ sowie die Parameter der inneren Orientierung für die beteiligten Kameras $(x_{H_k}, y_{H_k}, c_k, \Delta x_k, \Delta y_k)$ bestimmen. Hierfür werden aus den Kollinearitätsgleichungen 3.18 linearisierte Verbesserungsgleichungen aufgestellt:

$$\begin{aligned}
 x_i + v_{x_i} = & \frac{\partial x_i}{\partial X_i} dX_i + \frac{\partial x_i}{\partial Y_i} dY_i + \frac{\partial x_i}{\partial Z_i} dZ_i \\
 & + \frac{\partial x_i}{\partial X_{0_j}} dX_{0_j} + \frac{\partial x_i}{\partial Y_{0_j}} dY_{0_j} + \frac{\partial x_i}{\partial Z_{0_j}} dZ_{0_j} + \frac{\partial x_i}{\partial \varphi_j} d\varphi_j + \frac{\partial x_i}{\partial \omega_j} d\omega_j + \frac{\partial x_i}{\partial \kappa_j} d\kappa_j \\
 & + \frac{\partial x_i}{\partial x_{H_k}} dx_{H_k} + \frac{\partial x_i}{\partial y_{H_k}} dy_{H_k} + \frac{\partial x_i}{\partial c_k} dc_k + \frac{\partial x_i}{\partial \Delta x_k} d\Delta x_k + x_i^0
 \end{aligned} \tag{3.35}$$

$$\begin{aligned}
y_i + v_{y_i} = & \frac{\partial y_i}{\partial X_i} dX_i + \frac{\partial y_i}{\partial Y_i} dY_i + \frac{\partial y_i}{\partial Z_i} dZ_i \\
& + \frac{\partial y_i}{\partial X_{0j}} dX_{0j} + \frac{\partial y_i}{\partial Y_{0j}} dY_{0j} + \frac{\partial y_i}{\partial Z_{0j}} dZ_{0j} + \frac{\partial y_i}{\partial \varphi_j} d\varphi_j + \frac{\partial y_i}{\partial \omega_j} d\omega_j + \frac{\partial y_i}{\partial \kappa_j} d\kappa_j \\
& + \frac{\partial y_i}{\partial x_{H_k}} dx_{H_k} + \frac{\partial y_i}{\partial y_{H_k}} dy_{H_k} + \frac{\partial y_i}{\partial c_k} dc_k + \frac{\partial y_i}{\partial \Delta y_k} d\Delta y_k + y_i^0
\end{aligned}$$

Die Lösung des Ausgleichungssystems erfolgt entsprechend dem in Gleichung 3.32 vorgestellten Rechenschema mit den aus Näherungswerten berechneten Bildkoordinaten x_i^0 und y_i^0 . Neben der Bestimmung der ausgeglichenen Unbekannten (innere und äußere Orientierungen, Objektkoordinaten) lassen sich über die mitberechneten statistischen Größen (z.B. Verbesserungen der Bildkoordinaten, Standardabweichungen der Unbekannten, Abhängigkeiten zwischen Parametern) detaillierte Aussagen zur erreichten Genauigkeit des Ausgleichungssystems treffen. Die Beurteilung dieser Größen sowie die gezielte Anpassung einzelner Parameter erfordert jedoch weitreichende Kenntnisse und Erfahrungen bei der Planung, Durchführung und Auswertung photogrammetrischer Mehrbildverbände.

Der ausschließlich auf den Kollinearitätsgleichungen 3.18 beruhende ursprüngliche Ansatz der Bündelblockausgleichung lässt sich um geodätische Beobachtungen, wie Strecken, Richtungen oder Winkel erweitern (WESTER-EBBINGHAUS, 1985a). Darüber hinaus können Informationen aus dem Objektraum, wie bekannte Objektkoordinaten, Kollinearität von Punkten oder definierte Objektgeometrien in Form zusätzlicher Bedingungen in das Ausgleichungssystem eingeführt werden (REGENSBURGER, 1990). In (SCHNEIDER, 2009) wird zudem eine Erweiterung der klassischen Bündelblockausgleichung auf unterschiedliche Panorama- oder Fisheye-Kameras vorgestellt. Damit lassen sich unterschiedliche Beobachtungstypen, Objektkonditionen und Abbildungsgeometrien in einen gemeinsamen Ausgleichungsprozess integrieren.

3.3 Verfahren der digitalen Architektur- und Nahbereichsphotogrammetrie

Die Auswertung photogrammetrischer Aufnahmen erfolgt heute fast ausschließlich mit Hilfe spezieller Software am Rechner. So wurde der hohe gerätetechnische Aufwand für die Herstellung fotografischer Umbildungen mit analogen Entzerrungsgeräten mittlerweile vollständig durch digitale Verfahren abgelöst. Und auch die analytischen Verfahren der Zwei- und Mehrbildauswertung wurden in entsprechenden Auswerteprogrammen umgesetzt und um Funktionalitäten der digitalen Bildverarbeitung und Bildanalyse erweitert.

Lediglich für detaillierte Darstellungen in Genauigkeitsstufe IV (siehe Kap. 2.2) werden für Dokumentationen im Bereich Denkmalpflege und Restaurierung auch heute z.T. noch analytische Stereoauswertegeräte eingesetzt (BRUSCHKE, 2006). Der Grund hierfür ist die hohe optische Qualität und Genauigkeit bei der manuellen stereoskopischen Auswertung analoger Großformataufnahmen gegenüber stereoskopischen Auswerteverfahren am Rechner. Die Bilder werden durch eine entsprechende Optik und ohne den Umweg über eine Digitalisierung direkt betrachtet und ausgewertet.

Die in der Architektur- und Nahbereichsphotogrammetrie üblicherweise eingesetzten Verfahren der digitalen Auswertung sollen im Folgenden vorgestellt werden.

3.3.1 Automatisierte Messung markierter Objektpasspunkte

Gegenüber der manuellen Messung natürlicher Passinformationen im Bild kann durch den Einsatz markierter Objektpunkte der Messvorgang erheblich vereinfacht bzw. automatisiert werden. Dadurch ergibt sich eine deutliche Steigerung der Bildmessgenauigkeit bei gleichzeitiger Verkürzung der Messzeit.

Für die automatisierte Messung markierter Passpunkte existieren im Bereich der Industriephotogrammetrie verschiedene, sehr ausgereifte Lösungen (einen Überblick liefert u.a. CLARKE, 1994). Viele der hier eingesetzten Verfahren nutzen sogenannte retroreflektierende Marken mit einem kreisförmigen Punktzentrum, ggf. erweitert um Kodierungen zur automatischen Erkennung von Punktnummern (Abb. 3.10d, NIEDERÖST und MAAS, 1996). Diese Marken reflektieren das bei der Aufnahme verwendete Blitz- bzw. Kunstlicht in einem engen Kegel um die Einfallsachse und zeichnen sich damit gegenüber der eigentlichen Objektoberfläche deutlich ab. Durch Anwendung eines Schwellwertes auf die digitalen Bilder können so recht einfach die interessierenden Bildbereiche der Passmarken erkannt und vom restlichen Bildinhalt separiert werden. Die eigentliche Messung der kreisförmigen Marken kann dann beispielsweise mit einem Schwerpunktoperator erfolgen. Durch die Notwendigkeit des Einsatzes von Kunst- bzw. Blitzlicht können retroreflektierende Marken jedoch nur unter kontrollierten Beleuchtungsverhältnissen, also vor allem bei Innenaufnahmen, verwendet werden. Bei Tageslichtaufnahmen im Außenbereich mit größeren Aufnahmeabständen und ohne zusätzliche Beleuchtung müssen für die automatische Detektion dieser Marken aufwändigere Verfahren zur Anwendung kommen.

Im Gegensatz zu den in der Industriephotogrammetrie verwendeten kreisförmigen Marken kommen in den hier behandelten Anwendungsbereichen der Architektur- und Nahbereichsphotogrammetrie häufig Marken mit kreuzförmigen Mustern oder sogenannte Segmentmarken zum Einsatz (Abb. 3.10 a - c). Bei diesen Marken wird das Punktzentrum direkt durch den Schnittpunkt von Linien bzw. Segmentgrenzen definiert und kann auch mit geodätischen Messverfahren sehr genau bestimmt werden. Durch die markante Segmentgestaltung ist auch ohne den Einsatz retroreflektierender Materialien eine automatisierte Separierung dieser Marken im digitalen Bild möglich (ANNUSS, 1999). Die subpixelgenaue Messung der Punktzentren erfolgt anschließend mit Hilfe von Korrelationsverfahren in Kombination mit einer Kleinst-Quadrat-Anpassung oder über strukturelle Messverfahren für kreuzförmige Muster. Mit dem in (LUHMANN, 1986) vorgestellten Ringoperator existiert ein sehr flexibles und schnelles Verfahren zur subpixelgenauen Punktbestimmung sehr unterschiedlich gestalteter kreuzförmiger Muster.

In der Praxis der photogrammetrischen (Bau-)Aufnahme erweist sich der Einsatz kodierter Passmarken (Abb. 3.10 c und d) zur automatisierten Erkennung der Punktnummern vor allem in Kombination mit der geodätischen Passpunktmessung oft als zu unflexibel. Bei der Erfassung größerer Objekte (Fassaden) treten durch z.T. stark variierende Aufnahmeabstände große Unterschiede in den Bildmaßstäben, auch innerhalb eines Bildes auf, so dass Kodierungen nicht mehr zuverlässig erkannt werden. Damit wird jedoch der Einsatz der vollautomatischen Bildpunktmessung in Frage gestellt, denn ohne zuverlässige Punktidentifikation müssen die automatisch gemessenen Punktzentren im Anschluss manuell (um)benannt werden, wofür wiederum eine entsprechende Passpunktskizze vor Ort angefertigt werden muss.

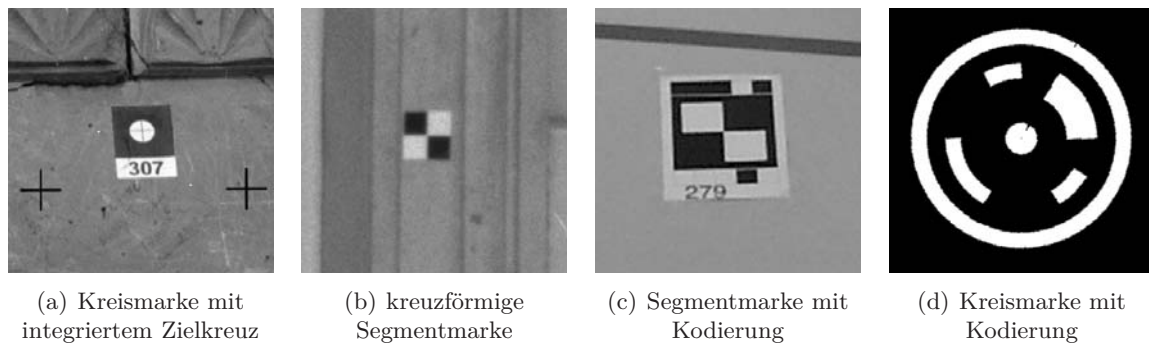


Abbildung 3.10: Beispiele für Passpunktmarken

Um die hohe Flexibilität bei der photogrammetrischen Aufnahme und geodätischen Passpunktmessung mit den Vorteilen der automatischen Bildpunktmessung zu verbinden, bietet sich ein kombiniertes interaktives Vorgehen an. Basierend auf der für Dokumentation und Auswertung unerlässlichen Passpunktskizze werden zunächst die für die jeweilige Auswertemethode minimal notwendigen Bildpunkte vom Bearbeiter näherungsweise vorgegeben. Die subpixelgenaue Messung des Punktzentrums erfolgt dann automatisch mit Hilfe entsprechender Verfahren der digitalen Bildanalyse. Für eine projektive Entzerrung müssen dabei mindestens 4 Punkte und für den räumlichen Rückwärtsschnitt (bei bekannter innerer Orientierung) mindestens 3 Punkte interaktiv gemessen werden, der manuelle Messaufwand bleibt also auch bei dieser Vorgehensweise sehr gering. Sobald die minimale Punktzahl interaktiv gemessen wurde, können Näherungswerte für die Orientierungs- bzw. Entzerrungsparameter über eine Zwangslösung berechnet werden. Mit diesen Parametern werden die noch nicht zugeordneten Objektpunkte in das jeweilige Bild projiziert und die so gefundenen Positionen als Startwerte für eine automatische Punktmessung verwendet. Die Nummerierung der Bildpunkte ergibt sich dabei aus den Punktnummern der zugehörigen 3D-Passpunkte. Mit den zusätzlich gefundenen Punkten werden die Transformationsparameter anschließend durch eine Ausgleichung erneut berechnet, wobei die Überbestimmung der Berechnung nun statistische Aussagen über die erreichte Genauigkeit zulässt.

3.3.2 Einbildauswertung

Die Gewinnung geometrischer Informationen aus nur einem (orientierten) Bild ist ohne zusätzliche Informationen oder Annahmen über die Objektgeometrie nicht möglich. Die Umkehrung der zentralperspektiven Abbildung ist nicht eindeutig, so dass jedem im Bild gemessenen Punkt beliebig viele Objektpunkte zugeordnet werden können. Erst durch den Schnitt von Bildstrahlen mit einer bekannten Geometrie im Objektraum ergibt sich eine eindeutige Lösung für die Bestimmung neuer Objektpunkte. Für die Auswertung von Einzelbildern werden folgende Objektgeometrien unterschieden (siehe Abb. 3.11):

- ebene Objekte
- geometrisch beschreibbare Objektoberflächen
- Freiformoberflächen



Abbildung 3.11: Objektgeometrien für die Einbildauswertung

Die Bestimmung von Objektkoordinaten kann dabei analytisch, also durch Transformation der im Ausgangsbild gemessenen Bildkoordinaten in das Objektsystem, oder durch geometrische Umbildung der Aufnahme über eine entsprechende Transformationsvorschrift und direktes Abgreifen von Geometrien im entzerrten Bild erfolgen. Für beide Vorgehensweisen werden jeweils die gleichen Transformationen verwendet, so dass die Ergebnisse einander entsprechen.

Im folgenden soll vor allem auf die Möglichkeiten der geometrischen Bildtransformation (Entzerrung, Abwicklung) eingegangen werden. Die Qualität der Berechnung kann hier anhand des transformierten Bildes sofort visuell beurteilt werden. Die maßstäblichen Umbildungen dienen in Bauforschung, Denkmalpflege und Archäologie zudem als geometrische Grundlage bei der Erstellung von Planunterlagen für die Objektdokumentation. Eine rein analytische Auswertung, basierend auf dem Ausgangsbild ist hier eher unüblich.

3.3.2.1 Geometrische Bildtransformation / Grauwertinterpolation

Digitale Bilder sind in Form diskreter Grauwerte $g(x, y)$ mit den Positionen x und y in der Bildmatrix organisiert. Anhand der zugrunde liegenden Transformationsvorschriften f_x und f_y kann für jede Position (x, y) im Eingabebild die neue Position (x', y') im Ausgabebild berechnet werden:

$$\begin{aligned} x' &= f_x(x, y) \\ y' &= f_y(x, y) \\ \text{bzw.} & \\ (x', y') &= f(x, y) \end{aligned} \tag{3.36}$$

Dem Grauwert g' an der Position (x', y') des Ausgabebildes kann nun der Grauwert $g(x, y)$ des Eingabepixels zugewiesen werden:

$$g'(x', y') = g(x, y) \tag{3.37}$$

Bei dieser *direkten* Grauwertzuordnung kann es jedoch zu ‘leeren’ Pixeln im Ausgabebild bzw. zu Mehrfachbelegungen von Ausgabepixeln kommen.

Um dies zu vermeiden, wird im allgemeinen eine *indirekte Grauwertzuordnung* vorgenommen. Durch Umkehrung der Transformationsvorschriften wird für jedes durchlaufene Pixel des Ausgabebildes die zugehörige Position im Eingangsbild berechnet und an der ermittelten Stelle über eine entsprechende Interpolation ein Grauwert bestimmt:

$$(x, y) = f^{-1}(x', y') \quad (3.38)$$

Als Ergebnis der indirekten geometrischen Transformation ergeben sich gewöhnlich keine ganzzahligen Werte für die Position (x, y) im Eingangsbild. Die Zuweisung eines Grauwertes $g'(x', y')$ im Ausgabebild erfolgt deshalb über eine geeignete Interpolation I unter Berücksichtigung der Grauwerte aus der Umgebung der errechneten Pixelposition im Eingangsbild:

$$g'(x', y') = I(g(x, y)) \quad (3.39)$$

Für dieses, als *Resampling* bezeichnete Vorgehen, stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung:

Interpolation 0. Ordnung Im einfachsten Fall erfolgt eine Rundung (*Nächster Nachbar*) der reellen Koordinaten (x, y) , in deren Ergebnis man ganzzahlige Positionen im Eingangsbild erhält:

$$g'(x', y') = g(\text{round}(x), \text{round}(y)) \quad (3.40)$$

Dieses Verfahren arbeitet sehr schnell, hat jedoch den Nachteil, dass durch das Runden Verschiebungen und damit Ungenauigkeiten bis zu einem halben Pixel auftreten (Sägezahn-Effekte).

Da ausschließlich Grauwerte verwendet werden, die auch im Eingangsbild vorkommen, wird dieses Verfahren dort angewandt, wo eine *radiometrische* Veränderung des Bildinhaltes nicht erwünscht ist (z.B. Klassifizierung von Fernerkundungsdaten).

Interpolation 1. Ordnung Wesentlich bessere optisch-geometrische Ergebnisse erhält man durch eine *Bilineare Interpolation*, indem die Grauwerte aus einer 2×2 Umgebung der berechneten Pixelposition (x, y) berücksichtigt werden. Es wird das gewichtete Mittel der vier beteiligten Grauwerte berechnet, wobei als Gewichte die jeweils überdeckten Flächenanteile angenommen werden (BÄHR und VÖGTLE, 1991):

$$\begin{aligned} g'(x', y') = & g(x, y) \\ & + dx(g(i+1, j) - g(i, j)) \\ & + dy(g(i, j+1) - g(i, j)) \\ & + dxdy(g(i, j) - g(i+1, j) - g(i, j+1) - g(i+1, j+1)) \end{aligned} \quad (3.41)$$

Bei diesem Verfahren treten bereits erheblich längere Berechnungszeiten auf. Außerdem werden die Grauwertinformationen des Eingangsbildes verändert, was sich in Form eines Tiefpass-Effektes (Glättung) auswirkt.

Interpolationen höherer Ordnung Bezieht man in die Berechnungen die Grauwerte einer 4×4 Umgebung ein und verwendet Interpolationsansätze höherer Ordnung (*Bikubische Splines und Lagrange-Polynome*), so kann nochmals eine Steigerung der Grauwertqualität erreicht werden. Diese Verfahren benötigen jedoch die längste Rechenzeit und bringen gegenüber einer Interpolation 1. Ordnung nur geringe Qualitätssteigerungen.

Einen Vergleich der hier aufgeführten Interpolationsverfahren liefert Tabelle 3.1.

Resamplingmethode	Interpolations- umgebung	Anzahl Addit./ Multiplikation	Interpolations- fehler
Nächste Nachbarschaft	1x1	1	15.7%
Bilineare Interpolation	2x2	8	3.7%
Bikubische Splines	4x4	110	0.3%
Lagrangepolynome	4x4	80	0.3%

Tabelle 3.1: Vergleich verschiedener Interpolationsverfahren (aus BÄHR und VÖGTLE, 1991)

3.3.2.2 Projektive Transformation / Ebene Bildentzerrung

Die projektive Transformation stellt einen Sonderfall der Einbildauswertung für ebene Objekte dar und beschreibt die zentralprojektive Abbildung zwischen einer Objektebene und der Bildebene. Aus den allgemeinen Kollinearitätsgleichungen der zentralprojektiven Abbildung des Raumes (siehe z.B. REGENSBURGER, 1990) lassen sich für ebene Objekte die folgenden Projektionsbeziehungen zwischen Objektkoordinaten (X, Y) und Bildkoordinaten (x, y) herleiten:

$$\begin{aligned} X &= \frac{a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y}{1 + c_1 \cdot x + c_2 \cdot y} \\ Y &= \frac{b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot y}{1 + c_1 \cdot x + c_2 \cdot y} \end{aligned} \quad (3.42)$$

Die unbekannten Transformationsparameter a_i , b_i und c_i lassen sich unter Verwendung von mindestens 4 nicht-kollinearen in einer Ebene liegenden Passpunkten (X, Y) bestimmen. Durch entsprechende Umformung erhält man aus der nicht-linearen Form 3.42 die linearen Beobachtungsgleichungen:

$$\begin{aligned} a_0 + a_1 x + a_2 y - X - c_1 x X - c_2 y X &= 0 \\ b_0 + b_1 x + b_2 y - Y - c_1 x Y - c_2 y Y &= 0 \end{aligned} \quad (3.43)$$

die über eine Ausgleichung nach dem Schema $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{l}$ ohne Iteration direkt gelöst werden können.

Die Bildkoordinaten (x, y) in den Gleichungen 3.42 bzw. 3.43 sind beliebige kartesische Koordinaten in der Bildebene, so dass in digitalen Systemen direkt die gemessenen Pixelpositionen verwendet werden können. Eine Umrechnung in ein metrisches Bildkoordinatensystem muss nicht erfolgen. Da die Gleichungen zudem unabhängig von den Parametern der inneren Orientierung sind (Koordinaten des Bildhauptpunktes x_H, y_H , Kamerakonstante c_k), eignet sich das Verfahren zur Auswertung von Aufnahmen, die mit nicht kalibrierten (Amateur-) Kameras erstellt wurden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Objektivverzeichnung in dem vorgestellten Ansatz nicht berücksichtigt wird und eine entsprechende Korrektur der Bildkoordinaten bzw. eine geometrische Umbildung (Entzeichnung) der Aufnahme vorgeschaltet werden muss (siehe Kap. 5.1.2).

Die ebene Bildentzerrung liefert nur für Objektbereiche in der Entzerrungsebene richtige Ergebnisse. Objekte vor oder hinter der Entzerrungsebene werden lageversetzt und mit falschem Maßstab abgebildet (siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.3.3).

In Abhängigkeit der zu erreichenden Genauigkeit und dem damit zusammenhängenden Auswertemaßstab müssen zur vollständigen Erfassung größerer Objekte zumeist mehrere Aufnahmen erstellt und entzerrt werden. Werden die Passinformationen am Objekt in einem einheitlichen System bestimmt, so lassen sich die einzelnen Entzerrungen (geschoss- und raumübergreifend) zu einem maßstabsgerechten Bildplan montieren. Dabei können dann auch weitere zur Entzerrungsebene parallele Ebenen berücksichtigt werden, so dass auch eine Auswertung tiefegegliederter Objekte möglich ist. Neben den entzerrten Bilddaten lassen sich darüber hinaus auch Plan- und Geometriedaten in einen solchen Bildplan integrieren, sofern diese Daten sich auf das gleiche Objektsystem beziehen (siehe Abb. 3.12).

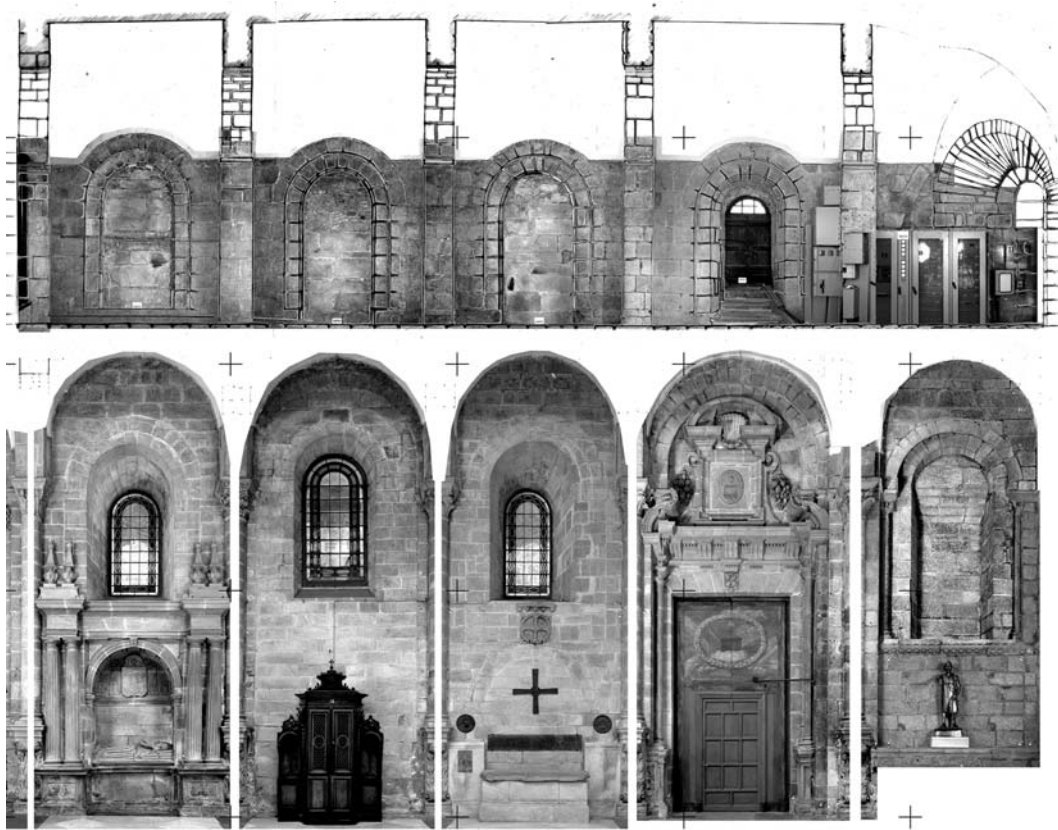


Abbildung 3.12: Maßstäblicher Bildplan aus mehreren Entzerrungen zusammen mit tachymetrisch bestimmten Geometrien (Kathedrale Santiago de Compostela, gemeinsame Darstellung von Haupt- und Emporengeschoss des südlichen Querschiffs)

3.3.2.3 Abwicklung

Unter einer photogrammetrischen Abwicklung wird die Umbildung eines orientierten Einzelbildes auf die abgewinkelte Mantelfläche eines Regelkörpers mit einfach gekrümmter Oberfläche (Zylinder und Kegel) verstanden. Ziel ist dabei die flächentreue Abbildung der Objektoberfläche für Dokumentations- oder Planungszwecke. Typische Beispiele für entsprechende Objekte sind Turmbauten, Gewölbe oder Apsiden.

Im Gegensatz zur projektiven Entzerrung müssen für eine Abwicklung die innere Orientierung samt Zusatzparametern sowie die äußere Orientierung der Aufnahme bekannt sein. Zusätzlich

müssen Lage und Form des abzuwickelnden Objektes im Koordinatensystem der äußeren Orientierung vorliegen. Die Beziehung zwischen der Abwicklungsebene und der ursprünglichen Aufnahme lässt sich dann in zwei Transformationsschritte unterteilen:

1. Transformation zwischen abgewickelter Fläche (2D) und gekrümmter Objektoberfläche (3D) (abhängig von geometrischem Objekt)
2. Transformation zwischen 3D-Objektoberfläche und 2D-Bildkoordinatensystem der Aufnahme (Kollinearitätsgleichungen)

Die Berechnung des abgewickelten Bildes erfolgt wiederum durch Umkehrung dieser Transformationen (Resampling, s.o.):

- Ausgehend von einem Pixel im neu zu erstellenden, abgewickelten Bild wird zunächst der zugehörige 3D-Punkt im Objektraum berechnet (Transformation 1),
- anschließend wird für diesen Objektpunkt der zugehörige Bildpunkt in der ursprünglichen Aufnahme berechnet (Transformation 2)
- und schließlich wird an der berechneten Position im Ausgangsbild der entsprechende Grau- oder Farbwert interpoliert und an der Position im abgewickelten Bild eingesetzt (Grauwertinterpolation, s.o.)

Bei der Bestimmung der Objektgeometrie können unterschiedliche Verfahren zum Einsatz kommen. Die Parameter einfacher Regelkörper können, z.B. im Rahmen der Passpunktbestimmung, aus wenigen tachymetrisch gemessenen Punkten abgeleitet werden. Größere Bauwerke lassen sich zumeist nicht mit nur einem Parametersatz beschreiben sondern sind vielmehr aus mehreren Körpern mit unterschiedlichen Parametern zusammengesetzt. Handelt es sich um rotationssymmetrische Körper mit identischer Lage und Ausrichtung der Rotationsachse, so kann an einer geeigneten Stelle ein Profil gemessen werden aus dem sich dann der Rotationskörper ableiten lässt. Bei stark gegliederten Objekten muss die Objektoberfläche jedoch deutlich detaillierter bekannt sein und kann z.B. im Rahmen eines Laserscans oder einer automatischen Stereo- bzw. Mehrbildauswertung in Form einer dichten 3D-Punktwolke erfasst werden (Abb. 3.13). Das Vorgehen entspricht dann einer Kombination aus parametrischer Abwicklung und differentieller Entzerrung (siehe nachfolgenden Abschnitt).



Abbildung 3.13: Abwicklung auf der Grundlage einer gescannten Punktwolke

Die Abwicklungen mehrerer Einzelaufnahmen eines Objektes können anschließend wieder zu einem einheitlichen Bildplan zusammenmontiert werden. Voraussetzung hierfür ist die gemeinsame Orientierung aller beteiligter Aufnahmen in einem einheitlichen Objektkoordinatensystem.

Weitere Beispiele für photogrammetrische Abwicklungen finden sich u.a. in (KARRAS u. a., 1996; HEMMLEB u. a., 2001; SIEDLER u. a., 2001).

3.3.2.4 Differentielle Entzerrung / Orthobildentzerrung

Trotz der aktuellen Entwicklungen bei der dreidimensionalen Erfassung, Modellierung und Visualisierung bilden zweidimensionale, orthogonale Ansichtsprojektionen auch weiterhin eine wesentliche Grundlage für die Dokumentation und Analyse von Bauwerken (siehe u.a. RHEIDT und ROHN, 2011; RIEDEL u. a., 2011). Aufgrund von Lageversatz und Maßstabsunterschieden lassen sich tiefengegliederte Objekte oder Freiformoberflächen über eine einfache projektive Entzerrung (s.o.) jedoch nicht in eine geometrisch richtige orthogonale Ansicht umbilden.

Für die Erzeugung eines Orthobildplans aus einer photogrammetrischen Aufnahme müssen, wie auch bei der Abwicklung, innere und äußere Orientierung der Aufnahme sowie die Geometrie der Objektoberfläche bekannt sein. Die Objektoberfläche wird dabei durch ein dichtes Netz dreidimensionaler Oberflächenpunkte (Digitales Oberflächenmodell, DOM) approximiert. Die Gewinnung entsprechender Geometrieinformationen kann mit Hilfe scannender Verfahren, über automatische Stereo- bzw. Mehrbildauswertung oder, bei einfach gegliederten Objekten, durch eine tachymetrische Aufnahme erfolgen.

Für die Repräsentation der digitalen Oberflächendaten existieren unterschiedliche Ansätze:

2,5D-Darstellung Aus den gemessenen Oberflächenpunkten wird, bezogen auf eine festgelegte Projektionsebene, über eine 2D-Triangulation (Delaunay-Triangulation) ein unregelmäßiges Dreiecksnetz erstellt. Anschließend kann daraus ein (regelmäßiges) Punktraster interpoliert werden, wobei für jeden Rasterpunkt die Höhe über der Bezugsfläche gespeichert wird (Abb. 3.14(a)). Dieser Ansatz wird für die Auswertung von Luftbildern verwendet, Bezugsfläche ist hier die X-Y-Ebene (Horizontalebene) des jeweiligen Lagebezugssystems. Die 2,5D-Darstellung eignet sich aber auch für einfach gegliederte Fassaden sowie Wand-, Boden- und Deckenansichten, bei denen keine Hinterschnitten auftreten und eine vollständige 3D-Modellierung nicht benötigt wird. Die Lage und Orientierung der Bezugsebene richtet sich nach der Ausrichtung des jeweiligen Ansichtssystems. Für jede Ansicht muss eine separate Dreiecksvermaschung berechnet und daraus wieder ein Höhenraster interpoliert werden.

3D-Darstellung Die Modellierung komplexerer Objektgeometrien erfolgt durch eine räumliche Vermaschung der unregelmäßig verteilten 3D-Objektpunkte, unabhängig von der Ausrichtung einer Ansichts- bzw. Projektionsebene (Abb. 3.14(b)). Damit kann ein weitgehend vollständiges Oberflächenmodell des Objektes, inklusive aller Hinterschnitten und Verdeckungen, generiert werden. Basierend auf diesem 3D-Oberflächenmodell können beliebig orientierte Projektionsebenen für die Berechnung von Orthobildern definiert werden. Das 3D-Modell kann neben der Erstellung von Orthobildern auch für

die Berechnung von Schnitten und Profilen, für die virtuelle Rekonstruktion von Bauwerken oder für Visualisierungszwecke genutzt werden.



(a) Interpoliertes Höhenraster über der Projektionsebene (2,5D)

(b) Dreiecksvermaschung der gescannten 3D-Punkte

Abbildung 3.14: Repräsentationsformen für ein Digitales Oberflächenmodell (als Grundlage für das in Abb. 2.2(c) gezeigte Orthobild)

Entsprechend der Berechnung einer digitalen Bildabwicklung lässt sich auch die differentielle Entzerrung in zwei Transformationsschritte unterteilen:

1. Transformation zwischen Orthobildebene (2D) und digitalem Oberflächenmodell (3D) (abhängig von der verwendeten Repräsentationsform des DOM)
2. Transformation zwischen 3D-Objektoberfläche und 2D-Bildkoordinatensystem der Aufnahme (Kollinearitätsgleichungen)

Die Berechnung des zum 3D-Objektpunkt gehörenden Bildpunktes im Ausgangsbild mit Hilfe der Kollinearitätsgleichungen in Transformation 2 ist für Abwicklung und differentielle Entzerrung identisch.

Auch bei der differentiellen Entzerrung werden die Bildinformationen des Ergebnisbildes durch Umkehrung der Transformationsvorschriften indirekt aus dem Ausgangsbild gewonnen (Resampling):

- Ausgehend von einem Pixel im Ergebnisbild wird, orthogonal zur Projektionsebene, der Schnittpunkt mit dem digitalen Oberflächenmodell berechnet. Liegt das DOM in Form einer Dreiecksvermaschung vor, kann der Schnittpunkt des orthogonalen Projektionsstrahls mit der betreffenden Dreiecksfläche direkt berechnet werden. Bei einer Rasterdarstellung wird der Oberflächenpunkt aus den Höhen der umliegenden Rasterpunkte interpoliert.
- Mit Hilfe der Kollinearitätsgleichungen wird der zugehörige Punkt im Ausgangsbild berechnet. Diese Zuordnung ist jedoch nicht eindeutig, so dass sich für unterschiedliche Punkte im Objektraum die gleichen Koordinaten im Bildraum ergeben können. Dies führt bei Verdeckungen und Hinterschnidungen zu Doppelabbildungen im Ergebnisbild (Abb. 3.15). Diese Doppelabbildungen können durch eine Sichtbarkeitsanalyse bzw. Strahlverfolgung (ray tracing) verhindert werden (KARRAS u. a., 2007).
- An der ermittelten Position im Ausgangsbild wird schließlich ein Grau- bzw. Farbwert interpoliert und an der zugehörigen Position im Ergebnisbild eingesetzt.



Abbildung 3.15: Doppelabbildungen im Orthobild aufgrund von Verdeckungen, rechts: durch Strahlverfolgung markierte, nicht sichtbare Bereiche

Für eine vollständige Erfassung größerer Objekte sowie zur Vermeidung von Fehlstellen aufgrund von Verdeckungen werden mehrere Aufnahmen des Objektes von verschiedenen Kamerastandpunkten aus benötigt. Werden alle beteiligten Aufnahmen im Koordinatensystem des Oberflächenmodells orientiert, lassen sich die einzelnen Orthobilder zu einem maßstäblichen Orthobildmosaik zusammenmontieren (Abb. 3.16). Idealerweise werden dabei die durch Verdeckungen entstandenen Fehlstellen in den einzelnen Orthobildern durch die entsprechenden Bereiche in anderen Aufnahmen ergänzt. Für einen homogenen Bildeindruck muss schließlich noch eine radiometrische Anpassung der verwendeten Orthobildbereiche erfolgen.

3.3.3 Digitale Stereoauswertung

Durch die photogrammetrische Aufnahme eines Objektes von mindestens zwei verschiedenen Standpunkten aus können räumliche Objektinformationen ohne Vorwissen oder Annahmen über die Geometrie der Objektoberfläche durch den Schnitt mehrerer Bildstrahlen (siehe Kap. 3.2.4) bestimmt werden. Die stereoskopische Auswertung bietet dabei gegenüber der monoskopischen Auswertung zweier Bilder (z.B. im Rahmen einer Mehrbildauswertung) den

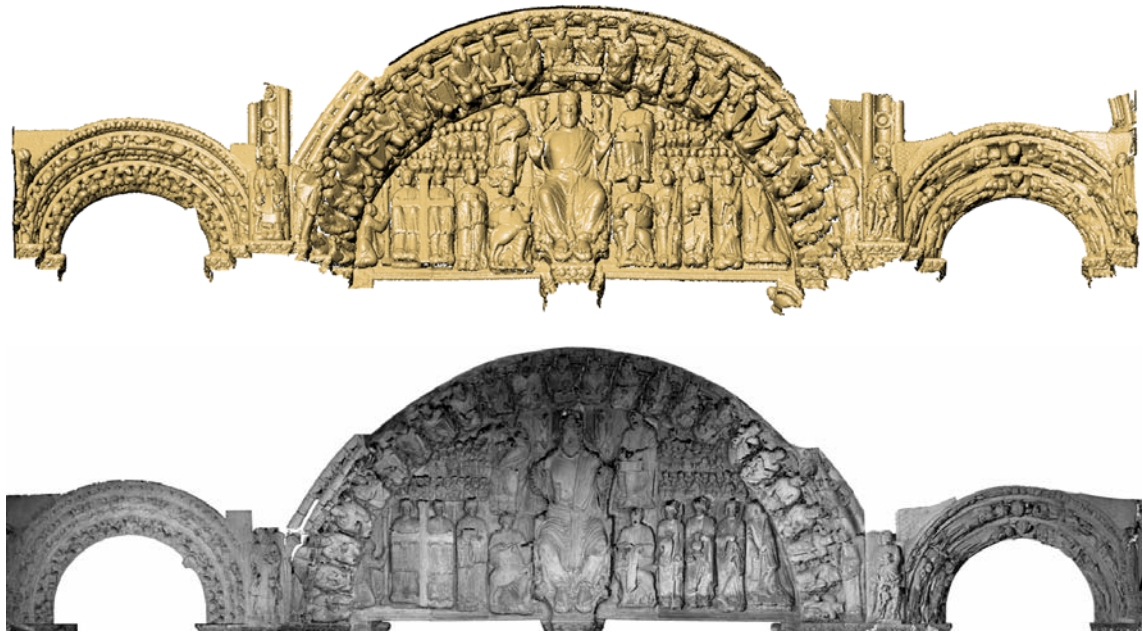


Abbildung 3.16: Digitales Oberflächenmodell aus Scannerdaten und Orthobildmosaik, zusammengesetzt aus 13 Einzelaufnahmen

Vorteil, dass durch die visuelle Zuordnung auch nicht-signalisierte Objektpunkte erfasst werden können. Zudem kann das aufgenommene Objekt durch die stereoskopische Betrachtung während der Auswertung räumlich wahrgenommen werden, wodurch zusätzliche Informationen zum Oberflächenzustand, zur Bearbeitungsqualität oder zur Tiefengliederung des Objektes unmittelbar visuell erfasst und beurteilt werden können. Speziell für die Anwendung im Nahbereich wurden hierfür Geräte und Verfahren entwickelt, die auch für die Bereiche Archäologie, Bauforschung und Denkmalpflege seit den 1970er Jahren regelmäßig zum Einsatz kommen (siehe u.a. DENDLER, 2001; PLANCK, 2001; ECKSTEIN, 2005).

Auch die Stereoauswertung findet mittlerweile fast ausschließlich am Rechner statt, analytische oder gar analoge Auswertegeräte kommen nur noch in Ausnahmefällen zum Einsatz. Durch die rechnergestützte Auswertung wird die klassische Stereoauswertung dabei um Verfahren der digitalen Bildanalyse erweitert, die eine weitreichende Automatisierung des Auswerteprozesses ermöglichen. Einen Schwerpunkt bilden dabei die in Kapitel 4.3 vorgestellten Zuordnungsverfahren sowie Verfahren zur automatischen Extraktion und Zuordnung bestimmter Bildmerkmale (Kap. 4.4 und 4.5).

Voraussetzung für die stereoskopische Betrachtung und Auswertung am Rechner ist ein geeignetes Verfahren zur Bildtrennung, so dass linkem und rechtem Auge nur das jeweils zugehörige Bild sichtbar ist. Zur Anwendung kommen hier Polarisations- oder FarbfILTER-Brillen (Anaglyphen-Brillen) sowie eine zeitliche Trennung über sog. Shutter-Brillen. Autostereoskopische Systemen ermöglichen eine stereoskopische Betrachtung am Monitor ohne zusätzliche Filterbrillen. Die Bildtrennung wird z.B. durch ein (bewegliches) Linsenraster auf der Monitoroberfläche realisiert. Entsprechend der Breite der Linsen werden abwechselnd schmale Streifen des linken und rechten Bildes gleichzeitig am Monitor dargestellt. Die streifenförmig angeordneten Linsen sorgen dafür, dass linkes und rechtes Auge nur den jeweiligen Bildstreifen sehen (Abb. 3.17). Über eine Blickverfolgung wird kontinuierlich die Position des

Betrachters vor dem Monitor registriert. Bei einer Bewegung wird die relative Lage zwischen den Bild- und Linsenstreifen der neuen Betrachterposition angepasst, so dass der Raumeindruck erhalten bleibt.

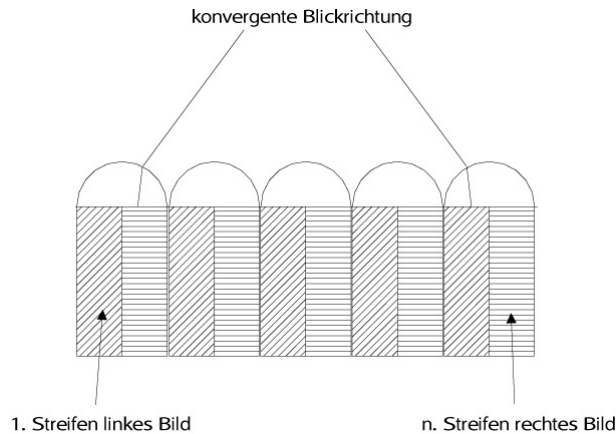


Abbildung 3.17: Funktionsprinzip der autostereoskopischen Betrachtung mit Lentikularlinsen

Die interaktive Stereoauswertung erfolgt auch am Rechner durch „Aufsetzen“ einer räumlichen Messmarke auf die virtuelle 3D-Oberfläche des Stereomodells. Dabei werden gleichzeitig die Bildkoordinaten der homologen Punkte im rechten und linken Bild gemessen und über einen räumlichen Vorwärtsschnitt die zugehörigen 3D-Modell- bzw. Objektkoordinaten berechnet. Das „Aufsetzen“ der Messmarke kann durch automatische Bildkorrelation (Kap. 4.3) unterstützt werden, so dass die Messung nicht durch die individuelle Tiefenwahrnehmung des Auswerters beeinflusst wird. Das Ergebnis einer digitalen, interaktiven Stereoauswertung kann z.B. eine dreidimensionale Vektorgrafik sein, die anschließend in einem CAD-Programm zu einem 2D-Ansichtsplan weiterverarbeitet wird oder als Grundlage für die Erstellung eines 3D-Modells dient. Die Vektordaten können während der Auswertung den stereoskopischen Bilddaten überlagert und damit visuell kontrolliert werden (Abb. 3.18). Entsprechende Systeme für die Anwendung im Nahbereich wurden u.a. in (BOOCHS u. a., 2000) und (HENZE, 2000) vorgestellt.

3.3.4 Mehrbildauswertung

Bei der digitalen Mehrbildauswertung werden die Objekt- bzw. Modellkoordinaten durch ausgleichenden Vorwärtsschnitt (Kap. 3.2.4) mehrerer Bildstrahlen bestimmt. Hierfür müssen die Parameter der inneren und äußeren Orientierung aller Bilder bekannt sein, die Berechnung erfolgt zumeist im Rahmen einer Bündelblockausgleichung (Kap. 3.2.6) im Vorfeld der eigentlichen Auswertung. Um eine möglichst hohe Genauigkeit bei der Bestimmung von Objektpunkten zu erreichen, wird das Objekt aus verschiedenen, z.T. stark konvergenten Aufnahmerrichtungen mit mehreren Bildern (>2) erfasst. Dabei bestehen prinzipiell keine Beschränkungen hinsichtlich der Anzahl der beteiligten Bilder sowie der für die Aufnahmen verwendeten Kameras. Die Aufnahmekonfiguration für eine Mehrbildauswertung wird vor allem durch die zu erreichende Genauigkeit und den auszuwertenden Objektbereich festgelegt. Im Gegensatz zur Aufnahme von Stereobildpaaren im (genäherten) Normalfall kann die geometrische Anordnung der Aufnahmen dabei frei gewählt werden.

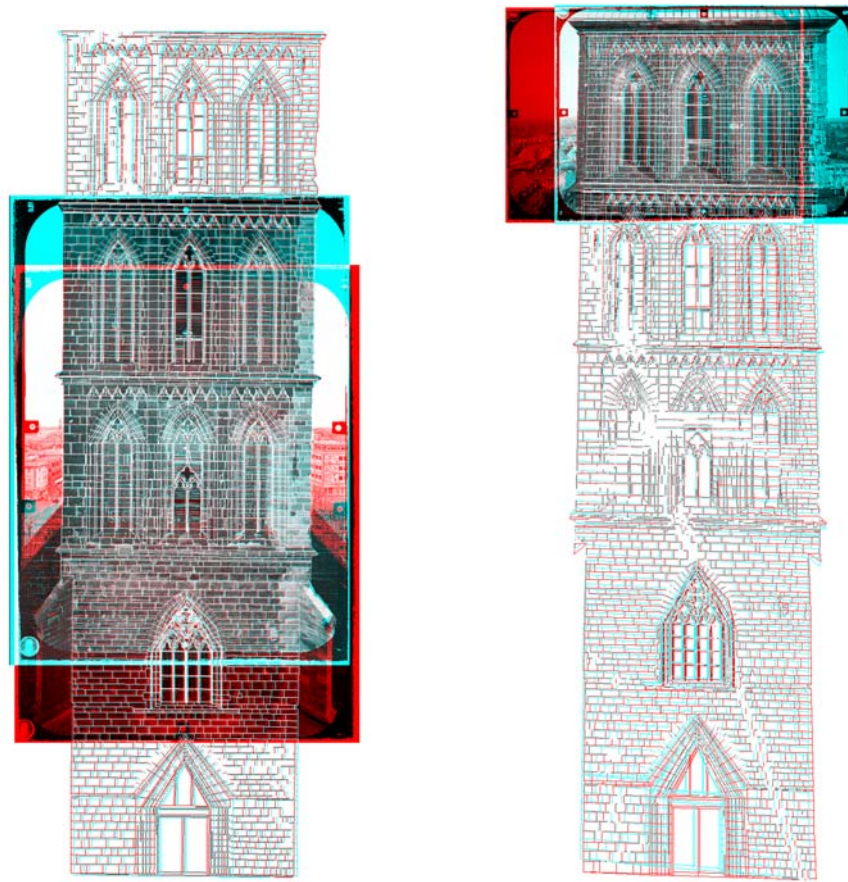


Abbildung 3.18: Ergebnis einer interaktiven Stereoauswertung mit einem digitalen Auswertesystem in Anaglyphendarstellung, links: vertikale Stereobasis, rechts: horizontale Stereobasis (photogrammetrische Aufnahme und Rohkartierung: fokus GmbH Leipzig)

Die Auswertung erfolgt durch interaktive oder automatisierte Messung homologer Punkte in mehreren Bildern. Voraussetzung dafür ist, dass sich die auszuwertenden Punkte in allen Bildern eindeutig identifizieren und entsprechend genau anmessen lassen. In der industriellen Photogrammetrie kommen hierfür signalisierte Zielmarken zum Einsatz, die sehr zuverlässig in mehreren Bildern automatisch gemessen werden können. Im Gegensatz dazu ist eine Zuordnung natürlicher, nicht-signalisierter Objektpunkte, aufgrund fehlender Objektstruktur sowie perspektiver Unterschiede bei konvergenten Aufnahmen, meist sehr aufwendig und nicht mit einer vergleichbaren Genauigkeit möglich. Eine automatische Punktzuordnung lässt sich nur unter geeigneten Aufnahmebedingungen (geometrische Konfiguration, Beleuchtung, Objektoberfläche, siehe Untersuchungen in Kap. 4.3.5) zuverlässig einsetzen.

Die interaktive Messung homologer Punkte in mehreren Bildern bedeutet damit einen erheblich höheren Messaufwand gegenüber der Einmalmessung von Objektpunkten bei der Stereoauswertung bzw. bei anderen Auswerteverfahren. Zudem lassen sich durch manuelle Messung und Zuordnung nur eindeutig zu identifizierende Objektgeometrien bestimmen (siehe Beispiel in Abb. 3.19), die Erfassung stetiger Objektbereiche, z.B. bei Freiformoberflächen oder an unstrukturierten Objektkanten, ist kaum möglich. Für eine verformungsgetreue (bzw. formtreue) Erfassung in den Genauigkeitsstufen III und IV (siehe Kap. 2.2) wird daher

meist eine stereoskopische Auswertung durchgeführt (siehe ECKSTEIN, 2001), während die Mehrbildauswertung in der Regel für die Erstellung vereinfachter Ansichtsdarstellungen oder 3D-Modelle eingesetzt wird.

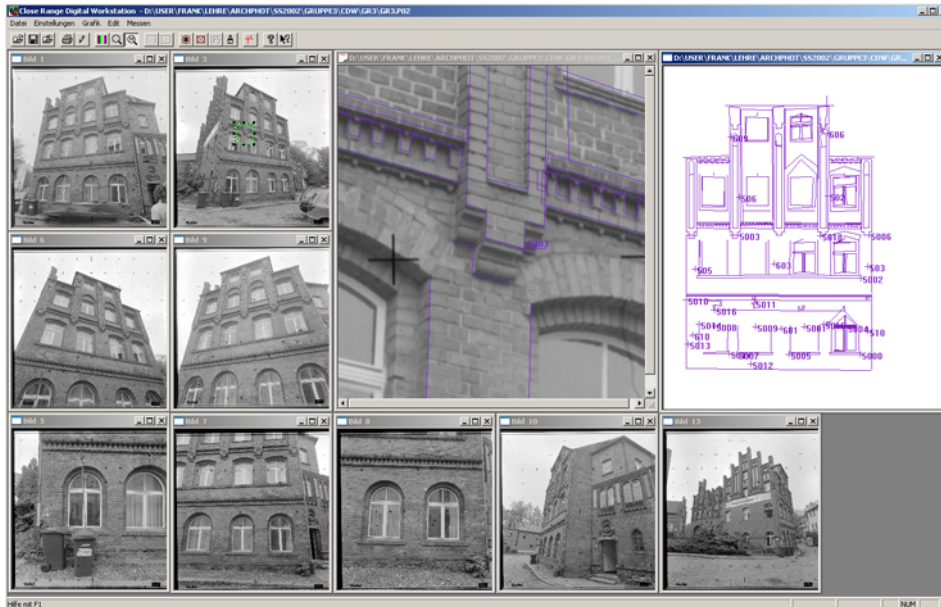


Abbildung 3.19: Mehrbildauswertung einer gegliederten Fassade mit Rollei CDW (entstanden im Rahmen einer studentischen Übung an der BTU Cottbus)

Die aufwendige Messung aller Objektgeometrien in mehreren Bildern lässt sich in den meisten Mehrbildsystemen vereinfachen, indem über wenige Objektpunkte eine das Objekt repräsentierende Bezugsfläche (z.B. Ebene, Zylinder) definiert wird (WEFERLING, 2001). Die Auswertung erfolgt dann durch Messung in nur einem Bild, wobei durch den Schnitt der Bildstrahlen mit der Bezugsfläche dreidimensionale Objektkoordinaten berechnet werden. Der Zwang zur Messung identischer Punkte in mehreren Bildern entfällt damit und es können beliebige Objektstrukturen ausgewertet werden, sofern diese auf der Bezugsfläche liegen. Weiterhin können benachbarte Bilder mit genähert parallelen Aufnahmerichtungen ggf. stereoskopisch ausgewertet werden, so dass auch hier Mehrfachmessungen vermeidbar sind.

Das Ergebnis einer Mehrbildauswertung sind 3D-Geometrien, die u.a. als Grundlage für die Ausarbeitung von 2D-Ansichtsplänen (Abb. 3.20) dienen können, oder die direkt für die Erstellung (vereinfachter) 3D-Modelle genutzt werden können. Mit Hilfe der Kollinearitätsgleichungen 3.18 können die berechneten 3D-Geometrien in die orientierten Bilder rückprojiziert werden und erlauben damit eine Kontrolle der Auswertung (und der Orientierung) auch in den Bildern, in denen die betreffenden Punkte nicht gemessen wurden.



Abbildung 3.20: Ausgearbeitete Fassadenpläne, basierend auf der Mehrbildauswertung aus Abbildung 3.19 (studentische Übung an der BTU Cottbus)

4 Ausgewählte Verfahren der digitalen Bildverarbeitung

Im Folgenden sollen die für eine automatisierte Auswertung in Stereo- und Mehrbildaufnahmen relevanten Verfahren der digitalen Bildverarbeitung vorgestellt und in bezug auf die speziellen Anforderungen in der Architekturphotogrammetrie hin untersucht werden. Insbesondere soll dabei auf erreichbare Genauigkeiten bei der automatisierten Messung sowie auf ggf. notwendige Anpassungen eingegangen werden. Weiterführende Informationen zur Repräsentation digitaler Bilder sowie zu allgemeinen Grundlagen der digitalen Bildverarbeitung finden sich u.a in (JÄHNE, 2005; VAN DER HEIJDEN, 1994; FISHER u. a.).

4.1 Filter

Digitale Filter zählen zur Klasse der Nachbarschaftsoperatoren und werden im Rahmen komplexer Bildverarbeitungsoperatoren u.a. eingesetzt zur:

- Detektion von Kanten, Ecken, Linien sowie Bereichen mit konstanten Grauwerten
- Texturanalyse
- Korrektur von Störungen bei der Bildaufnahme oder -übertragung

Sie bilden damit eine wichtige Grundlage für weiterführende Verfahren der digitalen Bildanalyse. Die Funktionsweise digitaler Filter sowie wichtige Vertreter dieser Klasse, die auch für die Entwicklungen im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden, sollen im Folgenden kurz vorgestellt und beschrieben werden.

4.1.1 Funktionsweise

Die Anwendung von Filterverfahren für die digitale Bildverarbeitung stellt einen Spezialfall der digitalen Signalverarbeitung dar. Neben der für die Betrachtung und Interpretation üblichen Darstellung digitaler Bilder im Ortsraum (Intensitätswerte in einem zweidimensionalen Punktfeld), spielt dabei die Bilddarstellung im Frequenzraum (Häufigkeit und Verschiebung eines periodischen Musters in Abhängigkeit von dessen Frequenz und Richtung) eine wesentliche Rolle. Beide Darstellungen beinhalten dabei jeweils die vollständigen Bildinformationen und lassen sich mit Hilfe der Fouriertransformation bzw. deren Umkehrung ineinander überführen (JÄHNE, 2005). Filteroperationen können sowohl im Orts- als auch im Frequenzraum ausgeführt werden. Im Folgenden werden ausschließlich die zur Klasse der Nachbarschaftsoperatoren zählenden Filter im Ortsraum betrachtet.

Filterverfahren auf der Basis von Nachbarschaftsoperatoren werden auch als ein- oder zweidimensionale Faltung bezeichnet. Aus dem Eingangsbild G wird dabei durch eine gewichtete Mittelbildung mit einem Filteroperator H ein verändertes (gefiltertes) Ergebnisbild G' berechnet. Die Grauwerte einer Umgebung ($m \times n$) um die aktuelle Position $g(x, y)$ werden hierfür mit den Wichtungsfaktoren $h(m, n)$ der Filtermatrix multipliziert und aufsummiert. Der berechnete Grauwert wird ggf. durch einen zusätzlichen Faktor f auf den Wertebereich $[0..255]$ normiert und an die Position $g'(x, y)$ im Ergebnisbild geschrieben:

$$g'(x, y) = \frac{1}{f} \sum_{u=-k}^{+k} \sum_{v=-l}^{+l} h_{u,v} \cdot g_{x-u, y-v} \quad (4.1)$$

mit

$$k = (m - 1)/2 \quad \text{und} \quad l = (n - 1)/2$$

Die Faltung wird durch spalten- und zeilenweise Verschiebung der Filtermatrix für alle Grauwerte des Eingangsbildes durchgeführt. Der relative Bezugspunkt der Nachbarschaftsumgebung, an dessen Position auch das Ergebnis der Faltung abgelegt wird, entspricht dem Zentrum der ($m \times n$) großen Filtermaske. m und n sind daher in der Regel ungerade Zahlen, wobei für viele Operatoren $m = n$ ist.

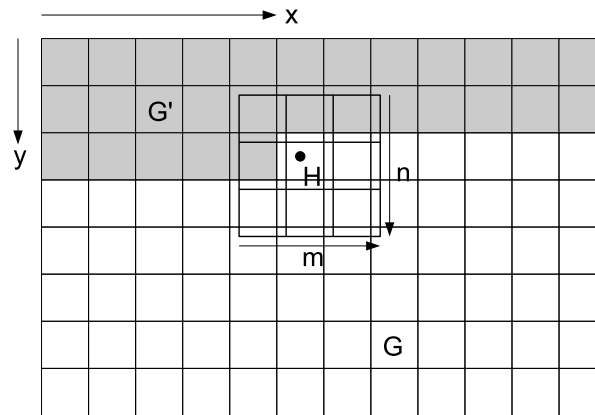


Abbildung 4.1: Funktionsweise Faltung eines Bildes G mit der 3×3 Filtermaske H

Die Faltung eines Bildes mit einer 2D-Filtermaske ist jedoch sehr rechenaufwendig und benötigt $m \times n$ Multiplikationen sowie $(m \times n) - 1$ Additionen. Bei der konkreten Implementierung wird die Separierbarkeit bestimmter Operatoren genutzt, wobei das Bild nacheinander mit einer eindimensionalen Maske in x- und y-Richtung gefaltet wird. Mit den beiden eindimensionalen Filtermasken $h1$ und $h2$ sowie den zugehörigen Normierungen $f1$ und $f2$ ändert sich Gleichung 4.1 zu:

$$g'(x, y) = \frac{1}{f1} \sum_{u=-k}^{+k} h1_u \cdot \left[\frac{1}{f2} \sum_{v=-l}^{+l} h2_v \cdot g_{x-u, y-v} \right]_{x-u, y} \quad (4.2)$$

Der Rechenaufwand reduziert sich dabei auf $m+n$ Multiplikationen und $m+n-2$ Additionen. Sämtliche in Kapitel 4.1.2 aufgeführten Filter lassen sich auf diese Weise optimieren.

4.1.2 Glättungsfilter

Mit Hilfe von Glättungs- bzw. Tiefpassfiltern sollen Unstetigkeiten der Grauwertfunktion $g(x, y)$, verursacht u.a. durch Bildrauschen, ungleichmäßige Beleuchtung oder inhomogenen Hintergrund, unterdrückt werden. Sie sind damit Grundbausteine zahlreicher Verfahren der digitalen Bildverarbeitung und werden u.a. für die Erzeugung von Bildpyramiden (Kap. 4.1.2.1), die Extraktion und Messung punktförmiger Merkmale (Kap. 4.2) sowie für verschiedene Verfahren der Kantenerkennung und Konturverfolgung (Kap. 4.4) eingesetzt.

Im einfachsten Falle erfolgt eine Glättung durch Mittelbildung der Grauwerte des Eingangsbildes in einer durch die Größe $m \times n$ der Filtermaske H festgelegten Umgebung um die Position $g(x, y)$. Die Filtermaske H für dieses sogenannten Rechteck- bzw. gleitende Mittelwertfilter lautet:

$$H = \frac{1}{9} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Allerdings besitzen einfache Mittelwertfilter keine optimalen Glättungseigenschaften, da sie zu einem Verschmieren von Kanten führen und die Glättung abhängig ist von der Richtung und Stärke der Grauwertänderung im Bild.¹ Insbesondere für die Bildglättung im Vorfeld der Kantendetektion sind diese Filter daher ungeeignet.

Deutlich bessere Eigenschaften in Bezug auf die Erhaltung von Kanten weisen gewichtete Mittelwertfilter auf, deren Filtermasken aus den Werten der Binomial- oder Gauß-Verteilung gebildet werden. Die Koeffizienten für eindimensionale Binomialfilter ergeben sich durch aufeinanderfolgende Faltung mit der Maske $1/2 [1 \ 1]$ und entsprechen den Werten im *Pascalschen Dreieck*. Zweidimensionale Binomialfilter ergeben sich dann durch Faltung eines horizontalen mit einem vertikalen 1D-Binomialfilter. Für eine 5×5 -Binomialmaske erhält man damit:

$$H = H_x * H_y$$

$$H = \frac{1}{16} [1 \ 4 \ 6 \ 4 \ 1] * \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 \\ 4 \\ 6 \\ 4 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{256} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Die Koeffizienten der Filtermaske für ein Gauß-Filter lassen sich über die zweidimensionale Gauß-Funktion berechnen:

$$h(m, n) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{m^2 + n^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.5)$$

Für die Anwendung des Gauß-Filters auf ein digitales Bild müssen daraus diskrete Werte abgeleitet werden. Die Größe der Filtermaske ist dabei abhängig von der Farbtiefe des Bildes. Bei einer Quantisierung in 256 Grauwerte (8 Bit) werden Koeffizienten mit einem Abstand von mehr als 3 Standardabweichungen vom Mittel effektiv zu Null, so dass die Berechnung

¹Eine sehr anschauliche Darstellung der Eigenschaften und Nachteile einfacher Rechteckfilter findet sich in (JÄHNE, 2005).

der Filtermaske an dieser Stelle abgebrochen werden kann. Für ein Gauß-Filter mit der Standardabweichung $\sigma = 1$ erhält man damit eine Maskengröße von $m = n = 7$. Höhere Werte für die Standardabweichung führen zu größeren Filtermasken und damit zu einer stärkeren Glättung.

4.1.2.1 Erzeugung von Bildpyramiden

Als Beispiel für die Nutzung von Glättungsfiltern soll an dieser Stelle kurz auf die Generierung von Bildpyramiden eingegangen werden. Bildpyramiden werden u.a. für die Merkmalsextraktion, die hierarchische Mustererkennung sowie für die schnelle Bildzuordnung eingesetzt. Aus dem Originalbild werden dabei verkleinerte Bildebenen erzeugt, bei denen die Auflösung von Ebene zu Ebene auf die Hälfte reduziert wird. Eine einfache Auflösungsreduktion durch Weglassen jedes zweiten Pixels (Unterabtastung) verletzt jedoch das *Abtasttheorem* (siehe z.B. JÄHNE, 2005, S. 259) und führt zu Treppen- (Aliasing-) und Moiré-Effekten (siehe Abb. 4.2 rechts). Zur Vermeidung dieser Effekte wird das Bild der aktuellen Auflösungsstufe zunächst mit einem Gauß-Filter geglättet und anschließend verkleinert. Die durch mehrmalige Anwendung dieser Operation erzeugte Bildserie wird als Gaußpyramide bezeichnet.



Abbildung 4.2: Bildausschnitte aus der 3. Ebene einer Auflösungspyramide. Links: Berechnung über Gaußpyramide, Rechts: Auflösungsreduktion durch Unterabtastung

4.1.3 Einfache Kantenfilter

Im Gegensatz zu Glättungsfiltern sollen bei der Detektion von Kanten Grauwertänderungen verstärkt und Bereiche mit konstanten Grauwerten unterdrückt werden. Kanten stellen Diskontinuitäten der räumlichen Grauwertfunktion $g(x, y)$ dar und können mit Hilfe sogenannter Ableitungsfilter detektiert werden. Dabei sollen neben der Position der Kante auch deren Richtung und Stärke erfasst werden. Der Entwurf entsprechender Filtermasken basiert auf der 1. Ableitung der diskreten (1D-) Bildfunktion g :

$$g'(x) = \frac{g(x+1) - g(x)}{1} = g(x+1) - g(x), \quad (4.6)$$

womit sich unmittelbar die Filtermaske $H = [-1 \ +1]$ ergibt. Bei der Anwendung dieses sehr einfachen Operators werden neben den gesuchten Kanten allerdings auch unerwünschte Grauwertdifferenzen hervorgehoben, die z.B. auf Bildstörungen (Rauschen) oder feine Objektstrukturen zurückzuführen sind. Aus diesem Grund kommen meist größere Filtermasken zum Einsatz, bei denen durch eine gewichtete Mittelung der Grauwertumgebung zusätzlich eine Glättung erfolgt. Entsprechende Filter werden auch als *regularisierte Kantendetektoren* bezeichnet.

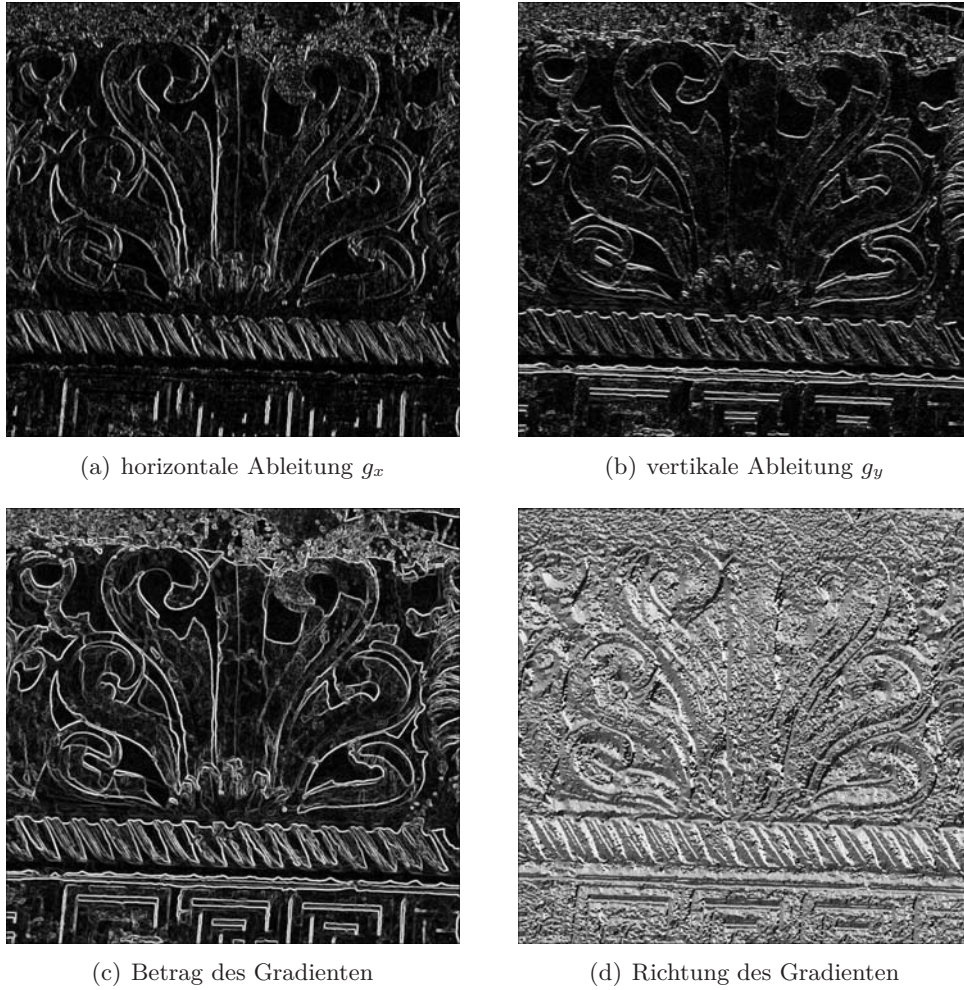


Abbildung 4.3: Ergebnisse des Sobeloperators

Richtung und Stärke einer Kante lassen sich mit Hilfe der partiellen Ableitungen g_x und g_y aus dem Gradienten der zweidimensionalen Grauwertfunktion $g(x, y)$ berechnen. Hierzu wird das Bild getrennt für x- und y-Richtung mit entsprechenden Differenzoperatoren gefaltet. Als Ergebnis erhält man zunächst zwei Bildmatrizen, die die horizontale und vertikale Ableitung der Bildfunktion wiedergeben (siehe Abb. 4.3(a) und (b)). Richtung und Betrag einer Grauwertänderung bzw. einer Kante lassen sich daraus wie folgt berechnen:

$$\varphi = \arctan \frac{g_y}{g_x} \quad \text{und} \quad |g| = \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \quad (4.7)$$

Die Funktionsweise einfacher Kantendetektoren soll anhand des Sobel-Operators demonstriert werden. Optimierungen sowie weitere Verfahren finden sich in der entsprechenden

Fachliteratur (u.a. in KLETTE und ZAMPERONI, 1996; SCHARR, 2000; JÄHNE, 2005).

Der Sobelfilter approximiert die Richtungsableitungen g_x und g_y durch Faltung mit zwei Differenzfiltern H_x und H_y , die das Bild senkrecht zur Ableitungsrichtung glätten:

$$H_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad H_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Die Ergebnisse des Sobeloperators für den in Abbildung 4.2 gezeigten Bildausschnitt sind in Abbildung 4.3 dargestellt. Neben den bereits erwähnten Richtungsableitungen g_x und g_y zählen hierzu auch der Betrag, d.h. die Stärke der Kante, sowie die (grauwertkodierte) Richtung der detektierten Kante.

Aus Abbildung 4.3(c) wird deutlich, dass die Ergebnisse einfacher Ableitungsfilter in dieser Form noch nicht für eine photogrammetrische Auswertung genutzt werden können. Durch die Faltung werden zunächst wieder Rasterdaten generiert, die der Auflösung des Ausgangsbildes entsprechen. Kanten werden hierin als mehrere Pixel breite helle Linien hervorgehoben und die Kantenbilder weisen zahlreiche, durch die Objekttextur hervorgerufene Störungen auf. Erst mit Hilfe einer mehrstufigen Kantenextraktion lassen sich daraus subpixelgenaue Kantenpolygone berechnen (siehe Kap. 4.4.1).

4.2 Interest-Operatoren

Mit Hilfe von Interest-Operatoren lassen sich markante Punkte in digitalen Bildern extrahieren und als Kandidaten für eine anschließende Korrespondenzanalyse verwenden. Die aufwendige manuelle Messung homologer Punkte für die relative Orientierung von Stereobildpaaren oder Mehrbildverbänden kann damit vollständig automatisiert werden, wodurch eine größere Anzahl von Verknüpfungspunkten schnell und ohne Mehraufwand bestimmt werden kann.

Für Anwendungen im Bereich der digitalen Bildanalyse und des Computer-Sehens wurden bereits recht früh Verfahren der Merkmalsextraktion für die Zuordnung in Stereobildern oder in Bildsequenzen entwickelt (z.B. MORAVEC, 1977). Aktuelle Arbeiten, wie z.B. der in (LOWE, 2004) vorgestellte SIFT-Operator (siehe Kap. 4.2.4) bzw. die darauf aufbauende Optimierung in Form des SURF-Operators (BAY u. a., 2006) zeigen, dass es nach wie vor einen Bedarf an optimierten Lösungen für die Frage der Merkmalsextraktion und -zuordnung gibt.

Allgemein wurden in (FÖRSTNER, 1986) folgende Anforderungen an die durch einen Interest-Operator extrahierten Punkte gestellt:

- Deutlichkeit in Bezug auf Nachbarregionen
- Invarianz gegenüber radiometrischen und geometrischen Verzerrungen
- Unempfindlichkeit gegenüber Rauschen
- Seltenheit der extrahierten Punktmerkmale
- Interpretierbarkeit hinsichtlich der Art der gefundenen Punkte

In der Literatur finden sich zahlreiche vergleichende Untersuchungen zum Einsatz von Interest-Operatoren für die Korrespondenzanalyse, die, je nach Anwendungsgebiet, zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen (SCHMID u. a., 2000; RODEHORST, 2004; REMONDINO, 2006; KOZEMPEL, 2007). Aus der großen Zahl der verfügbaren Interest-Operatoren sollen nachfolgend exemplarisch einige der für die photogrammetrische Auswertung relevanten Verfahren kurz vorgestellt werden. Detaillierte Beschreibungen zur Herleitung der einzelnen Operatoren finden sich unter den jeweiligen Literaturverweisen.

4.2.1 Förstner-Operator

Speziell für die Anwendung in der Luftbildauswertung wurde in (FÖRSTNER, 1986) bzw. (FÖRSTNER und GÜLCH, 1987) ein optimiertes Verfahren zur Merkmalsextraktion vorgestellt, das, ebenso wie der in (HARRIS und STEPHENS, 1988) vorgestellte Operator, auf der Analyse der Autokorrelations-Funktion basiert. Über die beiden Schwellwerte für Rundheit und Stärke eines Punktmerkmals lässt sich die Anzahl der gefundenen Interestpunkte objektabhängig steuern. Allerdings kann eine globale Schwellwertbildung für das gesamte Bild zu ungünstigen Verteilungen der extrahierten Punkte führen. Während es in strukturreichen Bildregionen zu einer Punktanhäufung kommt, bleiben wenig strukturierte Bereiche unberücksichtigt.

Eine gleichmäßigere Verteilung lässt sich durch Anwendung der Schwellwerte auf kleinere Teilbereiche des Bildes erreichen. Zweckmäßigerweise wird das Bild hierzu in gleichgroße Segmente geteilt, auf die dann die Schwellwerte adaptiv angewandt werden (RODEHORST, 2004). Die jeweils stärksten Punkte in jedem Segment werden als Kandidaten für die anschließende Punktzuordnung verwendet, wodurch sich eine überschaubare Anzahl von Interest-Punkten ergibt. Abbildung 4.4 zeigt den Vergleich zwischen globaler Schwellwertbildung und der Anwendung der Schwellwerte auf jeweils 200 x 200 Pixel große Bildsegmente. Im Anschluss an die Bestimmung der ganzzahligen Position kann aus der Punktstärke des extrahierten Punktes und seiner unmittelbaren Nachbarn die Subpixel-Position über eine Paraboloid-Anpassung (siehe Kap. 4.3.3) interpoliert werden.



(a) globale Schwellwertbildung, 2382 gefundene Punkte



(b) adaptive Schwellwertbildung, 271 gefundene Punkte

Abbildung 4.4: Anwendung des Förstner-Operators

4.2.2 SUSAN-Operator

Ein recht einfaches Verfahren, das auf einer Analyse der Grauwerte innerhalb eines kreisförmigen Untersuchungsgebietes beruht, wurde in (SMITH und BRADY, 1997) als SUSAN Feature Detector (Smallest Univalve Segment Assimilating Nucleus) vorgestellt und ist unter (SMITH) als C-Quelltext verfügbar. Hierbei wird die Anzahl der Bildpunkte innerhalb der Kreismaske (im Normalfall 37 Pixel) bestimmt, deren Grauwertdifferenzen zum Kernpunkt kleiner als ein vorgegebener Schwellwert t sind. Als Ergebnis der Analyse können aus der Anzahl der gezählten Bildpunkte drei Merkmalstypen unterschieden werden:

- bei einer kleinen Punktzahl ($\leq 36/2$) liegt ein Eckpunkt bzw. ein markanter Einzelpunkt vor
- entspricht die Anzahl ca. der Hälfte der Kreismaske ($36/2$), so handelt es sich um einen Kantenpunkt
- bei einem Wert deutlich größer als $36/2$ liegt der untersuchte Punkt in einem homogenen Bildbereich

4.2.3 FAST-Operator

Mit dem FAST-Operator (Features from Accelerated Segment Test, ROSTEN und DRUMMOND, 2005, 2006) wird das im SUSAN-Operator angewendete Verfahren für den Bereich der Echtzeit-Verfolgung von Objekten in Bildsequenzen weiter optimiert. Die zu untersuchende Region wird hier auf die 16 Randpixel der kreisförmigen Maske begrenzt, wobei mindestens 12 *zusammenhängende* Pixel eine über dem Schwellwert t liegende Grauwertdifferenz zum Zentrumspixel aufweisen müssen. Aus dieser Forderung ergibt sich eine weitere Optimierung durch die Voranalyse der vier auf den Hauptachsen des Pixelkoordinatensystems liegenden Kreispunkte: von diesen müssen mindestens drei die Schwellwertbedingung erfüllen, ehe eine Analyse aller 16 Randpunkte erfolgt.

4.2.4 SIFT- / Lowe-Operator

In (LOWE, 2004) wird ein Verfahren zur Extraktion skaleninvarianter Bildmerkmale (SIFT - Scale-Invariant Feature Transform) vorgestellt. Das zu untersuchende Bild wird hierbei wiederholt mit einem geeigneten Gauß-Filter gefaltet, wodurch zunächst eine Reihe gleichgroßer Bilder (Skalen) mit zunehmender Glättung (bzw. umgekehrt: mit abnehmender Detailwiedergabe) entsteht. Die so erzeugte Bildsequenz deckt dabei eine Oktave (JÄHNE, 2005) ab, was einer Verdopplung von σ bei der Gauß-Faltung entspricht (siehe Kapitel 4.1). Aus den jeweils benachbarten Gauß-Bildern einer Oktave werden Differenzbilder erstellt in denen dann nach lokalen Extrema gesucht wird. Hierzu wird eine 3×3 Umgebung im aktuellen Bild sowie in den beiden benachbarten Skalen, also insgesamt 26 Nachbarpixel untersucht.

Der Operator liefert in Abhängigkeit der Bildgröße und des Bildinhaltes zunächst eine sehr große Anzahl sogenannter *Keypoints* pro Bild (für das Beispiel in Abb. 4.4 werden ca. 4300 Punkte ausgegeben), die dann über die Keypoint-Merkmale (Deskriptoren) zugeordnet werden. Eine qualitative Filterung der Keypoints über einen Schwellwert ist nicht vorgesehen, so dass homologe Punkte durch einen Vergleich aller Punkte untereinander gefunden werden

müssen. Als Zuordnungskriterium zweier Punkte wird dabei der euklidische Abstand ihrer Deskriptor-Vektoren verwendet. Der Operator wird in (LÄBE und FÖRSTNER, 2005) bzw. (LÄBE und FÖRSTNER, 2006) für die automatisierte Orientierung größerer Bildverbänden eingesetzt und ist auch Bestandteil der freien Panorama-Software „hugin - Panorama photo stitcher“ (<http://hugin.sourceforge.net/>, zuletzt besucht am 05.04.2015). Durch die Berechnung der verschiedenen Gauß-Bilder ist das Verfahren jedoch sehr rechen- und speicherintensiv. Die Merkmalsuche wird daher zumeist in kleineren Auflösungsstufen durchgeführt.

Im Gegensatz zu den anderen vorgestellten Verfahren werden mit dem SIFT-Operator nicht explizit markante Punktmerkmale (Punkt-Detektor) extrahiert, sondern es werden Bereiche erkannt (Regionen-Detektor), die in benachbarten Auflösungsstufen (Skalen) eine große Ähnlichkeit besitzen. In der Regel handelt es sich dabei jedoch um weitgehend homogene Bildbereiche, die zu Mehrdeutigkeiten bei der automatischen Bildzuordnung (z.B. im Rahmen der relativen Orientierung, Kap. 5.3.4) führen können. Sehr anschaulich ist diese Eigenschaft des SIFT-Operators in Abbildung 4.5 dargestellt. Der Operator wurde hier auf ein künstliches Bild mit einem Graustufenverlauf von links oben (weiß) nach rechts unten (schwarz) angewandt. Obwohl dieses Bild keinerlei Merkmale für eine Bildzuordnung enthält, liefert der Operator im linken oberen Bereich des Bildes mehr als 200 Keypoints.

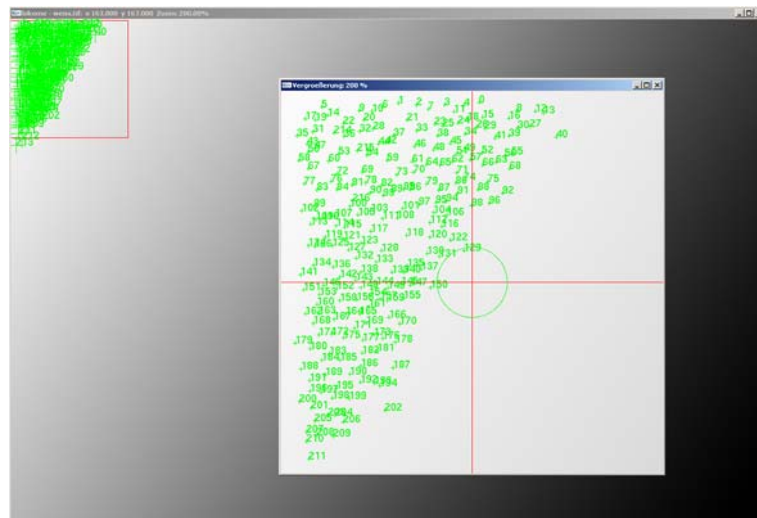


Abbildung 4.5: Ergebnis der Merkmalsextraktion mit dem SIFT-Operator für einen Graustufenverlauf

4.2.5 SURF-Operator

In (BAY u. a., 2006) wird mit dem SURF-Operator (SURF - Speeded Up Robust Features) eine auf dem SIFT-Operator basierende Optimierung vorgestellt, bei der die im SIFT-Operator verwendeten Gauß-Filter durch Mittelwert- bzw. Box-Filter approximiert werden. Die Rechenzeit für die Generierung der Auflösungsstufen ist damit unabhängig von der Größe der jeweiligen Filtermatrix. Grundlage für die Zuordnung von Merkmalen bilden auch hier die Deskriptor-Vektoren der gefundenen Keypoints, als Zuordnungskriterium wird ebenfalls deren euklidischer Abstand verwendet. Vergleiche beider Verfahren (u.a. in BAUER u. a., 2007;

JUAN und GWUN, 2009) zeigen ähnliche Ergebnisse, wobei der SURF-Operator aufgrund der verwendeten Filter-Approximation eine deutlich kürze Rechenzeit benötigt.

4.2.6 Auswahl und Optimierung

Mit allen vorgestellten Verfahren lassen sich markante Punkte in Bildern extrahieren und mit unterschiedlichem Aufwand für eine Korrespondenzanalyse nutzen. In (RODEHORST, 2004) wird die Eignung der vorgestellten Verfahren unter verschiedenen geometrischen und radiometrischen Bedingungen untersucht. Die Ergebnisse dieses Vergleichs sowie die Untersuchungen in (REMONDINO, 2006) zeigen dabei Vorteile des Förstner-Operators gegenüber anderen Verfahren. Mit eigenen Untersuchungen kann dies bestätigt werden, wobei jedoch ein weiteres Entscheidungskriterium ausschlaggebend ist: einzig der Förstner-Operator erlaubt eine qualitative Einordnung der gefundenen Interest-Punkte über die Werte für Rundheit und Stärke des Punktmerkmals. Zusammen mit der adaptiven Anwendung der Schwellwerte auf kleinere Teilregionen des Bildes lässt sich die Punktzahl deutlich reduzieren und damit die Korrespondenzanalyse erheblich beschleunigen.

Durch die Faltung des gesamten Bildes mit einem Gauß-Filter und der sich daran anschließenden Berechnung von Punktstärke und Rundheit mit Hilfe der Autokorrelationsmatrix ist auch der Förstner-Operator ein rechen- und speicherintensives Verfahren zur Merkmalsextraktion. Eine Optimierung ergibt sich durch Anwendung des Verfahrens auf eine niedriger aufgelöste Version des Bildes. Hierzu wird bereits beim Öffnen des Bildes innerhalb der Anwendungssoftware dynamisch eine Bildpyramide (siehe Kap. 4.1.2.1) erstellt, die dann auch für andere Verfahren der Bildanalyse verwendet werden kann. Bereits in der ersten Pyramidenstufe reduziert sich dabei die Datenmenge auf $1/4$ des Originalbildes, was, je nach Implementierung der Faltungsoperatoren, auch zu einer erheblichen Verkürzung der Rechenzeit führt. In der konkreten Umsetzung des Förstner-Operators wird für eine Anwendung auf die erste Pyramidenstufe $1/4$ der Rechenzeit gegenüber der vollen Bildauflösung benötigt.

Eine Reduktion der Auflösung führt jedoch zwangsläufig auch zu einem anderen Ergebnis bei der Merkmalsextraktion. Durch den Glättungsvorgang werden kleine Punktmerkmale nicht mehr aufgelöst und verschwinden, während an größeren Punktmerkmalen z.T. deutliche Lageänderungen auftreten. Für die Extraktion nicht markierter, homologer Punkte kann dieses Verhalten aber unberücksichtigt bleiben. Die mit Subpixelgenauigkeit bestimmten Interest-Punkte werden in die höchste Auflösungsstufe übertragen und für die Korrespondenzanalyse weiterverwendet. Ob der extrahierte Punkt in der originären Bildauflösung ggf. eine andere Position besitzt spielt hierfür keine Rolle, sofern die Merkmalsextraktion für beide Bilder in der gleichen Pyramidenstufe erfolgt.

Stark konvergente Aufnahmen, wie sie z.B. im Rahmen eines Mehrbildverbandes auftreten, können dazu führen, dass die mit dem Förstner-Operator detektierten *Punkt-Merkmale* aufgrund der perspektiven Unterschiede nicht zugeordnet werden können und somit nicht genügend homologe Punkte für die Bildorientierung bereitstehen. Für entsprechende Aufnahmeconfigurationen kommt daher häufig ein *Regionen-Detektor* wie der SIFT-Operator zum Einsatz (REMONDINO, 2006), bei dem als Merkmale für die Bildzuordnung skaleninvariante Bildbereiche bestimmt werden. Voraussetzung für eine zuverlässige Merkmalsextraktion und -zuordnung ist dabei jedoch, dass die Objektoberfläche genügend Textur besitzt, da homogene Bildbereiche zu Fehlzuordnungen führen können.

Der SIFT-Operator ist auf die Extraktion von Bildmerkmalen für eine *paarweise* Zuordnung von Bildern hin optimiert und kann daher für die automatische relative Orientierung eines Stereobildpaares alternativ zum Förstner-Operator eingesetzt werden. Für eine Orientierung von drei oder mehr Bildern im Rahmen einer Bündelblockausgleichung sollen identische Punkte in möglichst vielen der beteiligten Aufnahmen gemessen werden. Mit dem SIFT-Operator werden jedoch keine markanten Punkt-Merkmale bestimmt, die sich eindeutig in *mehreren* Bildern wiederfinden lassen. Aufgrund der sehr großen Anzahl detektierter Keypoints ergeben sich daher in der Regel für jedes Bildpaar unterschiedliche Punktidentitäten, so dass homologe Punkte zumeist nur in zwei (benachbarten) Bildern vorhanden sind. Für die in Kapitel 5.3.5 gezeigten Untersuchungsbeispiele zur automatischen Orientierung einer Vier-Kamera-Konfiguration ergeben sich bei Anwendung des SIFT-Operators, abgesehen von einzelnen Ausnahmen, keine Punktidentitäten in drei oder gar vier Bildern. Im Gegensatz dazu beträgt bei der Punktextraktion mit dem Förstner-Operator der Anteil homologer Punkte, die in mehr als zwei Bildern zugeordnet werden konnten, durchschnittlich 48%.

4.3 Flächenbasierte Bildzuordnung

Die flächenbasierte Bildzuordnung (*image matching*) hat sich zu einem grundlegenden Werkzeug für die Bereiche digitale Photogrammetrie, Computersehen (Computer Vision) und Bildanalyse entwickelt. Innerhalb der Photogrammetrie wird sie vor allem für die Messung homologer Punkte im Zuge der Bildorientierung, sowie für die interaktive und automatische Bestimmung von Objektpunkten bei der Auswertung von Stereobildern oder Mehrbildverbänden eingesetzt. Darüber hinaus kommen Zuordnungsverfahren u.a. für die Auswertung multitemporaler und multispektraler Aufnahmen sowie für Aufgaben der Mustererkennung und Merkmalsextraktion zum Einsatz.

Bei der flächenbasierten Bildzuordnung wird in einem Referenzbild eine Mustermatrix $f(x, y)$ um den zu bestimmenden Punkt (x, y) definiert und über ein geeignetes Ähnlichkeitsmaß die zugehörige Position der Suchmatrix $g(x, y)$ im Mess- bzw. Suchbild bestimmt.

Voraussetzung für eine zuverlässige Korrelationsanalyse ist das Vorhandensein einer geeigneten Objekttextur. Regelmäßige, sich wiederholende Texturen führen zu Mehrdeutigkeiten bei der Bildzuordnung (vergleiche MAAS, 1997), während in texturarmen Bildbereichen die Zuordnung gänzlich versagen kann, da hier nicht genügend Informationen für eine geometrische Anpassung vorliegen. Vor allem im industriellen Bereich kann die Bildzuordnung durch das Aufbringen einer zusätzlichen Textur mit Hilfe von Muster-Projektion (Abbildung 4.6) oder durch Oberflächenbeschichtung auch für texturarme Oberflächen gelöst werden. Beide Verfahren kommen in den Bereichen Archäologie, Bauforschung und Denkmalpflege nur in Ausnahmefällen zum Einsatz. Insbesondere bei Außenaufnahmen kann eine Musterprojektion nur mit größerem Aufwand realisiert werden und eine Beschichtung der Objektoberfläche kommt hier in der Regel nicht in Frage.

Die Ergebnisse der Bildzuordnung sind abhängig von der Beleuchtung des Objektes zum Zeitpunkt der Aufnahme. In der Regel werden fotografische Aufnahmen im sichtbaren Lichtspektrum für die Oberflächenbestimmung verwendet, die Objekte sollten hierfür möglichst gleichmäßig ausgeleuchtet sein. Große Helligkeitsunterschiede in verschiedenen Bildbereichen (u.a. Schlagschatten), stark unterschiedliche Belichtung von rechtem und linkem Bild sowie Über- oder Unterbelichtung führen zu einem schlechteren Zuordnungsergebnis. Ebenso wie



Abbildung 4.6: Erfassung eines Kotflügels durch automatisierte Stereoauswertung mit Projektion eines Zufallsmusters (unten: 3D-Punktwolke aus unterschiedlichen Blickrichtungen)

bei anderen photogrammetrischen Verfahren wird auch bei Aufnahmen für eine automatisierte Auswertung ein Mindestmaß an fotografischen Kenntnissen vorausgesetzt.

Verfahrensbedingte Einschränkungen ergeben sich bei der Auswertung stark tiefengegliederter Objekte. Abhängig von der Fokussierung, der eingestellten Blende sowie dem Abbildungsmaßstab ergibt sich bei fotografischen Aufnahmen ein bestimmter Tiefenbereich am Objekt der scharf abgebildet wird (Schärfentiefe). Objektbereiche außerhalb des Schärfentiefebereichs werden demnach unscharf abgebildet und können zu einer Verschlechterung der Bildzuordnung führen. Darüber hinaus können bei starker Tiefengliederung des Objektes perspektive Verdeckungen in einem oder beiden Bildern auftreten. Für diese Bereiche ist eine Bildzuordnung nicht möglich und es entstehen Fehlstellen („Löcher“) in der Punktwolke bzw. im 3D-Modell.

Für die flächenbasierte Bildzuordnung werden weitgehend stetige Objektoberflächen vorausgesetzt. An Bruchkanten kann die Ähnlichkeit zwischen Muster- und Suchmatrix stark abnehmen, da ggf. nur die Hälfte der in der Mustermatrix definierten Fläche im zugehörigen Bereich der Suchmatrix sichtbar ist und nur dieser Bereich in die Berechnung des Ähnlichkeitsmaßes einfließt. Der Rest der Mustermatrix „ragt“ über die Kante hinaus und wird, je nach Perspektive und Objektgeometrie, in beiden Bildern unterschiedlich abgebildet. In Abhängigkeit der Größe der Mustermatrix und des festgelegten Mindestmaßes für die Ähnlichkeit zwischen Muster- und Suchmatrix ergeben sich an Kanten bzw. Unstetigkeitsstellen Zonen, in denen eine Bildzuordnung nicht mehr möglich ist (siehe Abb. 4.7). Betrachtet man die Ergebnisse aus Beispiel 4.1, so kann die Breite der Zone um Kanten, in denen eine Bildzuordnung nicht möglich ist, mit 50% der Breite bzw. Höhe der Mustermatrix angegeben

werden.

Beispiel 4.1:

Für die Bildzuordnung wird eine Mustermatrix mit 11 x 11 Pixeln definiert, das Mindestmaß für die Ähnlichkeit zwischen Muster- und Suchmatrix soll 80% betragen.

An einer vertikal verlaufenden Kante müssen damit die Pixel aus mindestens 9 Spalten der Mustermatrix mit den zugehörigen Pixeln im Suchbild *vollständig* übereinstimmen, wodurch sich eine 3 Pixel breite Zone zwischen dem Zentrum der Mustermatrix und der Kante im Suchbild ergibt, in der das geforderte Ähnlichkeitsmaß nicht erreicht werden kann und somit keine Punkte zugeordnet werden können (siehe Abb. 4.7). Kommt es aufgrund von Bildstörungen oder Helligkeitsunterschieden zu einer geringeren Ähnlichkeit innerhalb der verbleibenden Korrelationsfläche, müssen weitere Pixel in die Berechnung einbezogen werden und der Abstand zwischen Mustermatrix und Kante vergrößert sich weiter.

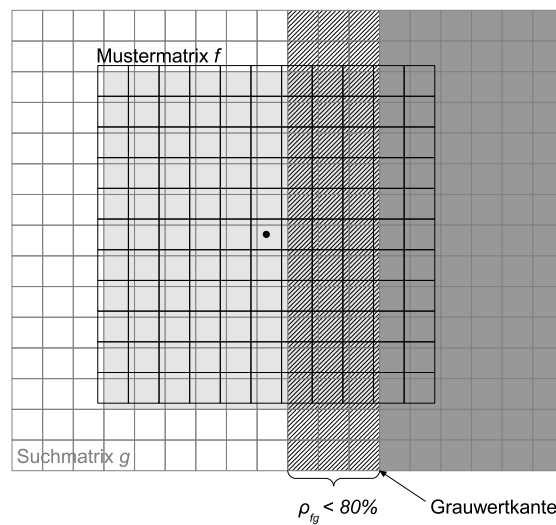


Abbildung 4.7: Bildzuordnung an einer vertikalen Grauwertkante

Im Folgenden sollen die am häufigsten verwendeten Zuordnungsverfahren kurz erläutert und ihre Eignung für den Einsatz im Nahbereich diskutiert werden.

4.3.1 Differenz-Korrelation

Im einfachsten Fall kann als Ähnlichkeitsmaß die Summe oder auch die Quadratsumme der Grauwertdifferenzen (Sum of Absolute/Squared Differences - SAD/SSD) zwischen Muster- und Suchmatrix herangezogen werden, die an der Position der besten Übereinstimmung minimal wird. Aufgrund der sehr einfachen und damit schnellen Berechnung werden die Verfahren u.a. für die Echtzeit-Bildzuordnung in Videosequenzen eingesetzt (MAAS, 1997).

$$SAD = \sum [f_i - g_i] \quad (4.9)$$

$$SSD = \sum [f_i - g_i]^2 \quad (4.10)$$

Bei beiden Verfahren fließen jedoch Kontrast- und Helligkeitsunterschiede sowie geometrische Unterschiede zwischen Muster- und Suchmatrix direkt in die Berechnung des Ähnlichkeitsmaßes ein, so dass die Verfahren nur für eine vereinfachte Zuordnung unter definierten radiometrischen und geometrischen Bedingungen eingesetzt werden können.

4.3.2 Normierte Kreuzkorrelation

Ein gegenüber radiometrischen Unterschieden zwischen beiden Bildausschnitten unempfindliches Ähnlichkeitsmaß ist der normierte Kreuzkorrelationskoeffizient, der aus den Standardabweichungen σ_f und σ_g der Muster- bzw. Suchmatrix sowie der Kovarianz beider Bildmatrizen σ_{fg} berechnet wird:

$$\rho_{fg} = \frac{\sigma_{fg}}{\sigma_f \cdot \sigma_g} \quad (4.11)$$

Ebenso wie die einfache Differenz-Korrelation liefert die Kreuzkorrelation zunächst ganzzahlige Positionen der berechneten Ähnlichkeitsmaße für den untersuchten Bildbereich (Abb. 4.8).

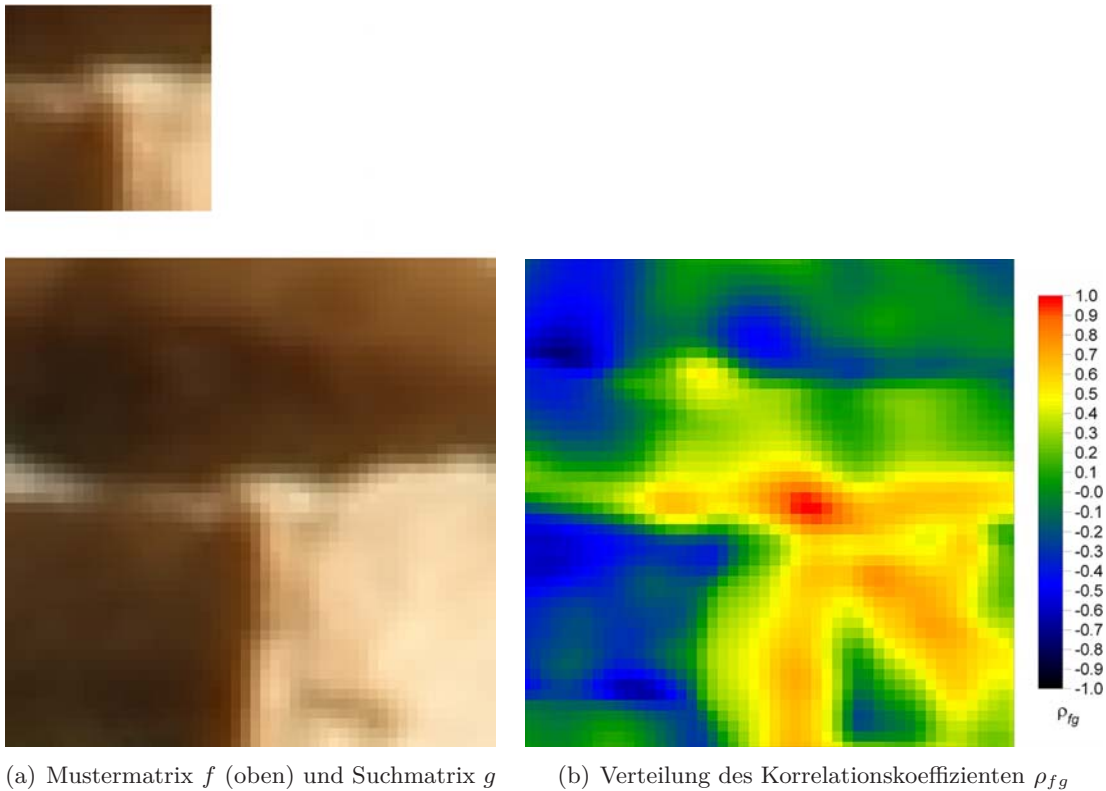


Abbildung 4.8: Flächenbasierte Bildzuordnung über normierte Kreuzkorrelation

Die subpixelgenaue Position der besten Übereinstimmung kann anschließend über eine flächenhafte Interpolation im Bereich des Korrelationsmaximums berechnet werden (siehe Kapitel 4.3.3). Die erreichbare Genauigkeit der Punktzuordnung liegt dann, abhängig von der geometrischen und radiometrischen Übereinstimmung der untersuchten Bildausschnitte, bei

0.05 - 0.1 Pixel (LUHMANN, 2000; RODEHORST, 2004). Geometrische Unterschiede zwischen Referenz- und Suchbild werden jedoch nicht berücksichtigt und führen, insbesondere bei konvergenten Aufnahmen oder stark unterschiedlichen Bildmaßstäben, zu einem geringeren Ähnlichkeitsmaß.

4.3.3 Paraboloid-Anpassung

Für die subpixelgenaue Bestimmung von Punktmerkmalen (z.B. aus der normierten Kreuzkorrelation) kann die 3 x 3 Nachbarschaft eines Punktes mit maximaler Stärke w über ein Paraboloid modelliert werden (RODEHORST, 2004). Mit der biquadratischen Paraboloidfunktion

$$w(x, y) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \quad (4.12)$$

erhält man ein überbestimmtes lineares Gleichungssystem

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{1} \quad (4.13)$$

mit

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1^2 & y_1^2 & x_1y_1 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2^2 & y_2^2 & x_2y_2 & x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_9^2 & y_9^2 & x_9y_9 & x_9 & y_9 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad \mathbf{1} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_9 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Die Berechnung der 6 unbekannten Koeffizienten $\mathbf{x} = (a, \dots, f)^T$ erfolgt durch Auflösung der Normalgleichungen

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A} \mathbf{x} &= \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{1} \\ \mathbf{x} &= (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{1} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Der Berechnungsvorgang in der konkreten Implementierung kann durch die Definition eines lokalen (Pixel-)Koordinatensystems mit Ursprung im Punkt (x, y) maximaler Punktstärke optimiert werden. Hierdurch erhält man eine konstante Design-Matrix \mathbf{A} und damit auch konstante Parameter für die inverse Normalgleichungsmatrix $\mathbf{N} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1}$.

Die Position für das Maximum des Paraboloids im lokalen Koordinatensystem kann in geschlossener Form direkt aus den partiellen Ableitungen

$$w_x = \frac{\partial w}{\partial x} = 2ax + cy + d \quad \text{und} \quad w_y = \frac{\partial w}{\partial y} = 2by + cx + e \quad (4.16)$$

der Gleichung (4.12) berechnet werden. Die Subpixelverschiebung zur ganzzahligen Position (x, y) ergibt sich dann zu

$$\Delta x = \frac{2bd - ce}{c^2 - 4ab} \quad \text{und} \quad \Delta y = \frac{2ae - cd}{c^2 - 4ab} \quad (4.17)$$

Die normierte Kreuzkorrelation mit anschließender Subpixelinterpolation über eine Paraboloid-Anpassung ist ein nicht iteratives und damit schnelles Verfahren der Bildzuordnung, das sich vor allem für die automatisierte Auswertung stereoskopischer Aufnahmen im genäherten Normalfall anbietet. Das Verfahren wird auch für die schnelle Berechnung von Näherungswerten im Rahmen einer Kleinste-Quadrate-Anpassung (Kap. 4.3.4) eingesetzt.

4.3.4 Kleinste-Quadrate-Anpassung

Bei den bisher genannten Verfahren der Bildzuordnung wird über Grauwertdifferenzen die Ähnlichkeit zwischen zwei Bildausschnitten bestimmt. Die Mustermatrix wird hierfür über das Suchbild verschoben, um die Position der besten Übereinstimmung zu finden. Gegebenenfalls wird mit Hilfe der Ähnlichkeitswerte in der Nachbarschaft des Maximums die Lage zwischen Muster- und Suchmatrix im Subpixelbereich interpoliert. Eine geometrische *Anpassung* beider Bildausschnitte erfolgt jedoch nicht, so dass perspektive Abbildungsunterschiede, hervorgerufen u.a. durch Tiefengliederung des Objektes, unterschiedliche Bildmaßstäbe oder konvergente Aufnahmen, direkt zu einem schlechteren Zuordnungsergebnis führen. Streng genommen können diese einfachen Zuordnungsverfahren daher nur für Aufnahmen weitgehend ebener Objekte im Stereonormalfall eingesetzt werden, wobei Bild- und (mittlere) Objektenebene möglichst parallel sein sollten.

Die Bildzuordnung nach kleinsten Quadraten (*least squares matching, LSM*) berücksichtigt hingegen sowohl eine radiometrische als auch eine geometrische Transformation zwischen Muster- und Suchmatrix. Dabei werden durch Minimierung der Quadratsumme der Grauwertdifferenzen zwischen Muster- und Suchmatrix die gesuchten Transformationsparameter iterativ geschätzt. Das Verfahren wurde bereits zu Beginn der 1980er Jahre für die analytische Luftbildauswertung entwickelt und kam hier in Kombination mit ersten CCD-Sensoren zur Filmabtastung in analytischen Auswertegeräten zum Einsatz (siehe u.a. FÖRSTNER, 1982; ACKERMANN, 1983; GRÜN, 1985).

Zunächst wird um den zu bestimmenden Punkt (x, y) im Referenzbild wieder eine Mustermatrix $f(x, y)$ definiert, deren zugehörige Position in einem Suchbild g bestimmt werden soll. Für den Idealfall der Korrelation zweier zugehöriger Bildausschnitte erhält man dann:

$$f(x, y) = g(x, y) \quad (4.18)$$

Aufgrund zufälliger Rauschanteile $e(x, y)$ in den Bildern wird Gleichung 4.18 erweitert zu:

$$f(x, y) - e(x, y) = g(x, y) \quad (4.19)$$

Die radiometrischen und geometrischen Unterschiede zwischen Muster- und Suchbild lassen sich hierin als unbekannte Transformationsparameter der Funktion $g(x, y)$ modellieren. Damit erhält man eine nichtlineare Beobachtungsgleichung der Form

$$\begin{aligned} f(x, y) - e(x, y) &= r_0 + r_1 \cdot g(x', y') \\ x' &= a_0 + a_1 x + a_2 y \\ y' &= b_0 + b_1 x + b_2 y \end{aligned} \quad (4.20)$$

Die radiometrische Anpassung erfolgt durch eine Verschiebung r_0 sowie eine Skalierung r_1 der Grauwerte in g , die geometrische Anpassung wird üblicherweise über eine Affintransformation mit den Parametern a_i und b_i modelliert. Für die Lösung des Gleichungssystems nach der Methode der kleinsten Quadrate müssen die Beobachtungsgleichungen 4.20 an Näherungswerten linearisiert werden:

$$\begin{aligned} f(x, y) - e(x, y) &= g^0(x, y) + g_x da_0 + g_x x da_1 + g_x y da_2 \\ &\quad + g_y db_0 + g_y x db_1 + g_y y db_2 + r_0 + r_1 g^0(x, y) \end{aligned} \quad (4.21)$$

Die Richtungsableitungen g_x und g_y werden dabei durch Faltung des Bildes mit einem Gradientenoperator (z.B. mit dem Sobel-Operator, siehe Gleichung 4.8) approximiert.

Aus Gleichung 4.21 ergeben sich die linearisierten Verbesserungsgleichungen für eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen in der bekannten Form

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \quad (4.22)$$

mit den Grauwertdifferenzen $f(x, y) - g^0(x, y)$ zwischen Muster- und Suchmatrix als Beobachtungsvektor \mathbf{l} , den zu schätzenden Parametern als Unbekanntenvektor \mathbf{x}

$$\mathbf{x}^T = [da_0, da_1, da_2, db_0, db_1, db_2, r_0, r_1]$$

und den partiellen Ableitungen von $g(x, y)$ nach den Unbekannten in der Designmatrix \mathbf{A} .

Die Schätzung der unbekannten Parameter \mathbf{x} erfolgt durch Minimierung der Quadratsumme der Verbesserungen \mathbf{v} entsprechend dem sogenannten Gauß-Markov-Modell (siehe Gleichung 3.32) mit:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}} &= (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \cdot (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}) && \text{Unbekanntenzuschläge} \\ \mathbf{v} &= \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l} && \text{Vektor der Verbesserungen} \\ \hat{\sigma}_0 &= \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{n - u}} && \text{Standardabweichung} \end{aligned} \quad (4.23)$$

Die Anzahl der Beobachtungen n entspricht der Anzahl der Pixel in der Mustermatrix, da für jedes Pixel eine Beobachtungsgleichung entsprechend Gleichung 4.20 aufzustellen ist. Die Anzahl der Unbekannten richtet sich nach dem gewählten Modell für die geometrische und radiometrische Anpassung. Bei Berücksichtigung aller in Gleichung 4.20 aufgeführten Parameter ergeben sich insgesamt 8 Unbekannte u .

Da die Beobachtungsgleichungen 4.20 nicht linear sind, muss das Ausgleichungssystem iterativ gelöst werden, ausgehend von folgenden Näherungswerten für die Unbekannten:

$$a_0^0 = a_2^0 = b_0^0 = b_1^0 = r_0^0 = 0 \quad \text{und} \quad a_1^0 = b_2^0 = r_1^0 = 1$$

Darüber hinaus sollte die Startposition (x_0, y_0) für die Suchmatrix g nur um wenige Pixel von der tatsächlich gesuchten Lage des Punktes im Musterbild abweichen. Als Näherungswerte können die Koordinaten einer vorgeschalteten Korrespondenzanalyse entsprechend Kap. 4.3.1 oder Kap. 4.3.2 verwendet werden, wobei die Merkmalsextraktion zur Beschleunigung des Berechnungsverfahrens in einer niedrigeren Auflösungsstufe der Bildpyramide (4.1.2.1) durchgeführt werden kann.

Nach jeder Iteration werden die Unbekanntenzuschläge an den Näherungswerten der vorangegangenen Iteration angebracht. Mit diesem Parametersatz wird über die Transformationsvorschrift in Gleichung 4.20 eine neue Suchmatrix $g^0(x, y)$ durch entsprechendes Resampling der Grauwerte an der Position x', y' im Suchbild erstellt. Die Iteration wird beendet, wenn die Werte der Unbekanntenzuschläge in $\hat{\mathbf{x}}$ ein festgelegtes Minimum unterschreiten (oder die maximale Anzahl von Iterationen erreicht ist).

Die Genauigkeit der Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate lässt sich über die üblichen statistischen Genauigkeitsmaße beurteilen. Die Verbesserungen \mathbf{v} aus Gleichung

4.23 können als verbleibende Abweichungen der Grauwerte zwischen der angepassten Suchmatrix und der gegebenen Mustermatrix interpretiert werden und lassen damit Aussagen über den Rauschanteil in den beteiligten Bildern zu. Aus den Diagonalelementen q_{jj} der Kofaktorenmatrix \mathbf{Q}_{xx} lassen sich die Standardabweichungen $\hat{\sigma}_j$ der geschätzten Parameter j berechnen:

$$\mathbf{Q}_{xx} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \quad (4.24)$$

$$\hat{\sigma}_j = \hat{\sigma}_0 \cdot \sqrt{(q_{jj})} \quad (4.25)$$

4.3.5 Evaluierung und Auswahl

Im folgenden soll die Leistungsfähigkeit der subpixelgenauen Bildzuordnung über normierte Kreuzkorrelation mit anschließender Paraboloid-Anpassung und über die Kleinste-Quadrate-Anpassung näher untersucht werden. Die einfache Differenz-Korrelation wird aufgrund der genannten Einschränkungen bei natürlichen Beleuchtungssituationen und den in der Praxis üblichen Aufnahmekonfigurationen hier nicht weiter betrachtet.

4.3.5.1 Rotation und Skalierung

Zunächst soll die Stabilität und Genauigkeit der Bildzuordnung bei *geometrischen* Unterschieden zwischen Referenz- und Suchbild untersucht werden. Hierfür wurden aus einem Referenzbild durch Rotation bzw. Stauchung des Bildes (Skalierung in einer Koordinatenrichtung) verschiedene Suchbilder generiert (siehe Abb. 4.9). Die Bildkoordinaten im Referenzbild wurden über den Förstner-Operator (4.2.1) bestimmt. Über die bekannten Transformationsparameter des geometrisch veränderten Suchbildes konnte ein direkter Soll-Ist-Vergleich der durch Bildzuordnung automatisch bestimmten Bildkoordinaten durchgeführt werden.



(a) Referenzbild



(b) 2,5°



(c) 5°



(d) 10°



(e) 20°



(f) 30°



(g) 5%



(h) 10%



(i) 25%



(j) 50%

Abbildung 4.9: Rotation und Stauchung (Skalierung in x-Richtung) des Referenzbildes

Aus Tabelle 4.1 wird deutlich, dass die Standardabweichung der Bildkoordinatenmessung bei unverändertem Suchbild sowohl für die Bildzuordnung über normierte Kreuzkorrelation mit Paraboloid-Anpassung als auch für die Kleinste-Quadrate-Anpassung kleiner als 0,05 Pixel (1/20 Pixel) ist. Bereits bei kleinen Rotationen des Suchbildes gegenüber dem Referenzbild steigt der Fehler für die Bestimmung der Koordinaten über normierte Kreuzkorrelation deutlich an, obwohl sich der Wert für den Korrelationskoeffizienten kaum ändert. Bei einer Rotation von 5° beträgt die Genauigkeit der Koordinatenmessung hier nur noch 1/4 Pixel, während sie für die Bestimmung über Kleinste-Quadrate-Anpassung bis zu einem Drehwinkel von 30° nahezu konstant bei 1/16 Pixel liegt. Allerdings steigt dabei die Anzahl der Iterationen bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums deutlich an.

Rotation	normierte Kreuzkorrelation			Kleinste-Quadrate-Anpassung			
	σ_x	σ_y	ρ_{KK}	σ_x	σ_y	ρ_{KK}	Iterationen
0°	0,048	0,045	1,00	0,041	0,039	0,99	1
$2,5^\circ$	0,121	0,144	0,99	0,054	0,061	0,98	4
5°	0,252	0,274	0,98	0,061	0,055	0,98	9
10°	0,591	0,562	0,95	0,063	0,062	0,98	15
20°	2,260	1,420	0,88	0,069	0,064	0,99	29
30°	3,010	2,540	0,81	0,083	0,063	0,99	43

Tabelle 4.1: Ergebnisse der Bildzuordnung bei Rotation des Bildes (σ_x, σ_y in Pixel)

Skalierung	normierte Kreuzkorrelation			Kleinste-Quadrate-Anpassung			
	σ_x	σ_y	ρ_{KK}	σ_x	σ_y	ρ_{KK}	Iterationen
5%	0,191	0,080	1,00	0,125	0,048	0,99	3
10%	0,379	0,201	0,99	0,168	0,067	0,99	7
25%	1,058	0,685	0,95	0,111	0,053	0,99	17
50%	3,247	2,266	0,85	0,335	0,110	0,98	52

Tabelle 4.2: Ergebnisse der Bildzuordnung bei Skalierung des Bildes in x-Richtung (σ_x, σ_y in Pixel)

Auch bei einer Skalierung des Bildes in einer Koordinatenrichtung (Tabelle 4.2) zeigen sich die Genauigkeitsvorteile der Kleinste-Quadrate-Anpassung gegenüber einer auf der normierten Kreuzkorrelation basierenden Zuordnung. Die Texturinformationen reichen hier jedoch nicht aus, um die Parameter der Affintransformation mit gleicher Genauigkeit zu bestimmen. So beträgt die Genauigkeit in Skalierungsrichtung bis 25% nur etwa 1/6 Pixel während sie in y-Richtung wieder bei 1/16 Pixel liegt.

4.3.5.2 Aufnahmekonfiguration und Sensoren

Die Leistungsfähigkeit beider Zuordnungsverfahren soll zusätzlich anhand konkreter Aufnahmesituationen untersucht werden. Aus verschiedenen Praxisbeispielen wurden hierfür Bildpaare ausgewählt, bei denen folgende Aufnahmeparameter variieren:

- Konvergenz der Aufnahmerichtungen
- Maßstäbe der beteiligten Bilder
- verwendete Aufnahmesensoren (digital und/oder analog).

Nr.	Modell	Aufnahmesensor		Aufnahme- konfig.	$\frac{m_l}{m_r}$	$d\phi$	σ_x	σ_y	ρ_{KK}	ρ_{LSM}
		links	rechts		[gon]					
(a)	Säule Baalbek	digital, FinePix S2	digital, FinePix S2	Normalfall	1,0	0	0,119	0,098	0,98	0,97
(b)	Venus-Tempel	digital, FinePix S2	digital, FinePix S2	Normalfall	1,0	1	0,027	0,087	0,98	0,96
(c)	Portal Bautzen	analog, Rollei 6006	analog, Rollei 6006	Normalfall	1,0	0	0,132	0,053	0,94	0,95
(d)	Venus-Tempel	digital, FinePix S2	digital, FinePix S2	konvergent	0,9	20	0,662	0,781	0,88	0,93
(e)	Kapitell Baalbek	digital, FinePix S2	digital, FinePix S2	konvergent	1,2	42	0,651	0,811	0,89	0,95
(f)	Architrav	digital, FinePix S2	digital, FinePix S2	konvergent	1,0	40	1,476	0,911	0,91	0,95
(g)	Kommode Berlin	analog, Linhof 9x12	analog, Linhof 9x12	~ parallel geneigt	1,0	1	0,308	0,176	0,97	0,97
(h)	Kommode Berlin	digital, FinePix S2	digital, FinePix S2	~ parallel geneigt	1,0	2	0,346	0,097	0,97	0,97
(i)	Kommode Berlin	analog, Linhof 9x12	digital, FinePix S2	~ parallel geneigt	0,5	2	3,224	2,281	0,74	0,87
(j)	Kapitell Palatin	analog, Rollei 6006	analog, Rollei 6006	Normalfall	1,0	0	0,470	0,185	0,93	0,94
(k)	Kapitell Palatin	digital, FinePix S2	digital, FinePix S2	Normalfall	1,0	0	0,258	0,161	0,97	0,97
(l)	Kapitell Palatin	digital, FinePix S2	analog, Rollei 6006	~ parallel	1,8	0	1,552	1,225	0,87	0,94

Tabelle 4.3: Ergebnisse aus Praxisbeispielen (die Modell-Nummern entsprechen den Farbtafeln in Anhang B)

Die Ergebnisse in Tabelle 4.3 bestätigen, dass für Aufnahmen im Stereonormalfall bei geeigneter Objektgeometrie (Modelle (a)-(c)) sehr gute Zuordnungsergebnisse sowohl über normierte Kreuzkorrelation als auch über Kleinste-Quadrate-Anpassung erzielt werden können. Die Abweichungen der Punktbestimmung zwischen beiden Verfahren (σ_x, σ_y) liegen hier bei maximal 0,13 Pixel, der Korrelationskoeffizient ρ ist für beide Verfahren in etwa gleich hoch. Dabei können entsprechende Genauigkeiten sowohl bei digitalen, als auch bei analogen Aufnahmepaaren erreicht werden.

Konvergente Aufnahmen mit großen Winkeln zwischen den Aufnahmerichtungen ($d\phi > 20$ gon, Modelle (d)-(f)) führen zu einem deutlichen Genauigkeitsverlust bei der Punktzuordnung über normierte Kreuzkorrelation, da projektive Unterschiede zwischen den Bildern hierbei nicht berücksichtigt werden. Die Bildkoordinaten weichen bis zu 1,5 Pixel von der durch Kleinste-Quadrate-Zuordnung ermittelten Position ab, der Korrelationskoeffizient ist deutlich kleiner als nach der geometrischen Anpassung.

Abweichungen zwischen der Oberflächennormalen und der Aufnahmerichtung, hervorgerufen durch geneigte Aufnahmen (Modelle (g)-(i)) bzw. nicht-ebene Objektoberflächen (Modelle (j)-(l)), führen ebenfalls zu geometrischen Unterschieden zwischen beiden Bildausschnitten und damit zu einem schlechteren Zuordnungsergebnis über normierte Kreuzkorrelation.

Und schließlich können bei der Kombination verschiedener Sensoren bzw. Aufnahmetechniken neben radiometrischen Unterschieden auch größere Maßstabsunterschiede zwischen den Bildern ($\frac{m_l}{m_r}$, Modelle (i) und (l)) auftreten, so dass die Zuordnung über die Kreuzkorrelation sehr unsicher wird bzw. gänzlich versagt.

4.3.5.3 Fazit

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass mit Hilfe flächenbasierter Zuordnungsverfahren auch im Bereich der Architekturphotogrammetrie sehr zuverlässig und genau korrespondierende Bildpunkte bestimmt werden können. Voraussetzungen hierfür sind:

- die Einhaltung bestimmter Aufnahmekonfigurationen: genäherter Normalfall, möglichst gleiche Kamera für die beteiligten Aufnahmen
- geeignete Objektgeometrien: möglichst stetige Oberfläche, Oberflächennormale möglichst parallel zur Aufnahmerichtung
- das Vorhandensein geeigneter Oberflächentexturen: unregelmäßig texturierte, nicht glänzende Oberflächen

Sowohl die Zuordnung über normierte Kreuzkorrelation als auch die Kleinste-Quadrate-Anpassung eignen sich damit vor allem für die stereoskopische Auswertung der Hauptansichtsflächen von Architekturbauteilen, baulichen Anlagen und Fassaden. Ziel ist dabei in der Regel die Erstellung von Orthobildplänen für definierte Objektansichten sowie die Gewinnung von 3D-Geometrien für eine anschließende 3D-Modellierung bzw. -Rekonstruktion des Objektes.

Für eine vollständige 3D-Erfassung von Objekten mit beliebigen Aufnahmekonfigurationen sind flächenbasierte Zuordnungsverfahren jedoch nur bedingt geeignet. Aufgrund der hier auftretenden geometrischen Abbildungsunterschiede in den beteiligten Aufnahmen kann eine zuverlässige Korrespondenzanalyse nicht garantiert werden. Statt einzelner, konvergenter Aufnahmen sind in einem solchen Anwendungsfall entsprechend viele Stereoaufnahmen anzufertigen und zunächst getrennt auszuwerten.

4.4 Kantenextraktion

Das Ergebnis der in Kapitel 4.1.3 aufgeführten Ableitungsfiler sind zunächst Bildmatrizen, in denen die Positionen potentieller Kantenpixel markiert sind. Für eine weiterführende Kantenanalyse können zusätzlich Richtung und Stärke der Kantenpixel grauwertkodiert als Bilder gespeichert werden. Die detektierten Kanten sind jedoch in der Regel mehrere Pixel breit, Informationen über zusammenhängende Kantenpunkte fehlen und die Kantenbilder enthalten oft zahlreiche durch die Objekttextur hervorgerufene Störungen. Für eine photogrammetrische Auswertung können die Ergebnisse einfacher Kantenoperatoren daher nicht direkt genutzt werden, sie bilden jedoch die Grundlage für mehrstufige Verfahren zur Kantenextraktion (z.B. morphologische Operatoren, Template-Matching oder kombinierte Ansätze, siehe (STEINBRECHER, 2005)).

4.4.1 Canny-Operator

Aus der Vielzahl der in der Literatur vorgestellten Verfahren zur Kantendetektion wurde der zur Gruppe der kombinierten Verfahren zählende Canny-Operator (CANNY, 1986) gewählt. Dieser Operator stellt den ersten methodischen Ansatz zur Realisierung eines idealen Kantendetektors dar und berücksichtigt dabei die folgenden Anforderungen (VAN DER HEIJDEN, 1994):

- richtige Erkennung: geringe Wahrscheinlichkeit für nicht erkannte bzw. falsch detektierte Kanten
- genaue Erkennung: korrekte Lokalisierung der Kantenposition
- Immunität gegenüber Störungen: keine Beeinflussung durch benachbarte Kantenstrukturen

Der Canny-Operator kombiniert diese Kriterien zu einem mehrstufigen Prozess, an dessen Ende ein binäres Kantenbild bzw. eine Liste mit den (subpixelgenauen) Positionen der gefundenen Intensitätssprünge steht:

1. Zunächst wird das Bild mit einem Gauß-Filter geglättet, wobei die Größe der Filtermaske über einen Wert für die Standardabweichung bei der Erstellung der Filtermaske festgelegt wird (siehe Kap. 4.1.2)
2. Ein einfacher 2D-Ableitungsfiler (z.B. der Sobel-Operator, siehe Kap. 4.1.3) wird auf das geglättete Bild angewandt, um Bereiche mit hoher erster Ableitung hervorzuheben. Für Kanten erhält man damit im Ergebnisbild Gratlinien maximaler Grauwertänderung.
3. Anschließend werden diese Grauwertgrate verfolgt und alle Pixel, die für die aktuelle Position kein Grauwertmaximum darstellen werden zu Null gesetzt, so dass sich im Ergebnisbild eine dünne Linie ergibt. Dieser Prozess wird als Non-Maxima Suppression (Nicht-Maximum-Unterdrückung) bezeichnet.
4. Dieser Kantenverfolgung schließt sich eine durch zwei Schwellwerte T_1 und T_2 kontrollierte Hysterese an, mit $T_1 > T_2$. Der Prozess startet an einem Kantenpunkt mit Grauwert höher T_1 und verfolgt die Kante in beide Richtungen so lange, bis deren Grauwert unter T_2 fällt. Durch diese Hysterese wird verhindert, dass verrauschte Kanten in mehrere einzelne Stücke zerfallen.

Der Prozess der Kantenerkennung wird also durch insgesamt drei Parameter gesteuert: die Größe der Gauß-Filtermaske während der Bildglättung, sowie oberer und unterer Schwellwert für die Kantenverfolgung. Eine Vergrößerung der Gaußschen Filtermaske durch Anhebung der Standardabweichung verringert die Empfindlichkeit des Detektors gegenüber Bildrauschen, bewirkt jedoch, dass feinere Details verloren gehen und der Fehler der gefundenen Kantenposition ansteigt. Für gute Ergebnisse kann der obere Schwellwert für die Kantenverfolgung sehr hoch und der untere Schwellwert recht niedrig angesetzt werden. Wird der untere Schwellwert zu hoch gesetzt, kommt es zum Abbruch der Verfolgung an verrauschten Kanten, ein zu niedriger oberer Schwellwert führt zum Ansteigen falscher und unerwünschter Kantenstücke.

4.4.2 Subpixelgenaue Kantenlokalisierung

In seiner ursprünglichen Form liefert der Canny-Operator zunächst ein binäres Kantenbild als Ergebnis der Non-Maxima Suppression (NMS), in welchem alle gefundenen Kantenpunkte markiert sind. Für eine Generierung von 3D-Informationen aus den detektierten Kanten muss die Position der Kantenpunkte jedoch subpixelgenau bestimmt werden. In (DEVERNAY, 1995) wird hierfür eine einfache Erweiterung zum NMS-Prozess vorgestellt, die über eine quadratische Interpolation der benachbarten Gradientenwerte die Subpixel-Position lokaler Maximumpunkte liefert.

An der Position (x, y) eines lokalen Maximums g werden zunächst aus 4 benachbarten Gradientenwerten g_1 bis g_4 die in Gradientenrichtung t liegenden Werte g_{12} bzw. g_{34} linear interpoliert (Abbildung 4.10):

$$\begin{aligned} g_{12} &= g_2 + t \cdot (g_1 - g_2) \\ g_{34} &= g_4 + t \cdot (g_3 - g_4) \end{aligned} \quad (4.26)$$

mit

$$t = \begin{cases} \frac{g_x}{g_y} & : |g_y| > |g_x| \quad (\text{vertikaler Gradientenverlauf}) \\ \frac{g_y}{g_x} & : |g_y| < |g_x| \quad (\text{horizontaler Gradientenverlauf}) \end{cases} \quad (4.27)$$

wobei die Berechnung von t abhängig von der Hauptrichtungen des Gradientenverlaufes erfolgt.

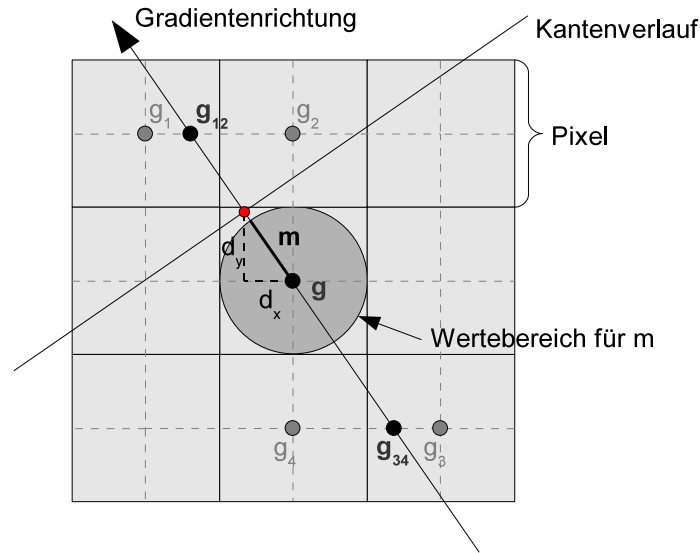


Abbildung 4.10: Subpixelinterpolation Canny-Operator

Anschließend wird aus g , g_{12} und g_{34} über eine quadratische Interpolation die Subpixelverschiebung in Gradientenrichtung berechnet. Für die ganzzahligen Pixel-Positionen der Grauwertgradienten $(-1, g_{12})$, $(0, g)$ und $(1, g_{34})$ ergibt sich die Position des Maximums zu:

$$m = \frac{g_{12} - g_{34}}{2(g_{12} - 2g + g_{34})} \quad (4.28)$$

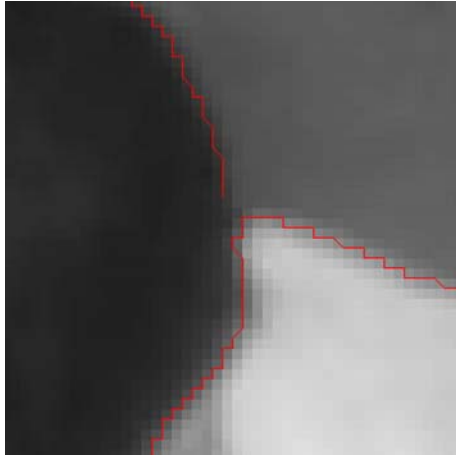
Mit $g \geq g_{12}$ und $g \geq g_{34}$ liegt der Wert für m im Bereich $-0,5 \leq m \leq 0,5$. Da hiermit zunächst nur die Fläche innerhalb eines Kreises mit dem Radius 0,5 Pixel um den maximalen Gradientenwert g erfasst wird (siehe Abb. 4.10), muss der Wert in Abhängigkeit der Haupt-Gradientenrichtung (siehe Gleichung 4.27) skaliert werden:

$$d_g = \frac{m}{\cos \phi} \quad \text{mit} \quad \phi = \arctan t \quad (4.29)$$

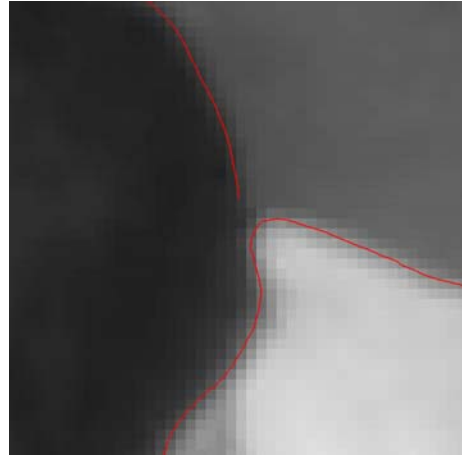
Über die Komponenten des Gradientenvektors $(g_x, g_y)^T$ erhält man schließlich die Subpixelverschiebungen in Spalten- und Zeilenrichtung:

$$d_x = \frac{g_x \cdot d_g}{|\vec{g}|} \quad \text{und} \quad d_y = \frac{g_y \cdot d_g}{|\vec{g}|} \quad (4.30)$$

Das ursprüngliche Ergebnis des Canny-Operators wird hiermit korrigiert und man erhält einen subpixelgenauen Kantenverlauf (siehe Abb. 4.11).



(a) pixelgenaue Kantenposition



(b) subpixelgenaue Lokalisierung

Abbildung 4.11: Ergebnisse des Canny-Operators

Zur Untersuchung der Kantenlokalisierung wurde ein synthetisches Bild generiert, das einen dunklen Kreis mit einem Radius von 212 Pixeln auf hellem Hintergrund zeigt. Der Mittelpunkt des Kreises wurde über einen Schwerpunktoperator subpixelgenau bestimmt, als Sollwert für den Radius wird der Mittelwert aus den Abständen der berechneten Kantenpunkte zum Kreismittelpunkt angenommen. Die Standardabweichung für einen Kantenpunkt ergibt sich damit zu:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}} \quad (4.31)$$

mit

$$v = r_{SOLL} - r_{IST} \quad \text{und} \quad n : \text{Anzahl der Kantenpunkte}$$

Mit den beschriebenen Erweiterungen des klassischen Canny-Operators lässt sich die Position der Kantenpunkte des Kreises auf bis zu 1/30 Pixel genau bestimmen. Die konkret

erreichbare Genauigkeit hängt jedoch stark von der Richtung des Kantenverlaufes sowie vom gewählten Glättungsfaktor ab (ROCKETT, 1999). Abbildung 4.12 zeigt die Abhängigkeit des Lokalisierungsfehlers Δr von der Richtung φ des Grauwertgradienten (der Verlauf der Abweichungen ist achsensymmetrisch, so dass hier nur der Bereich $0 \leq \varphi \leq 100$ gon abgebildet wird).

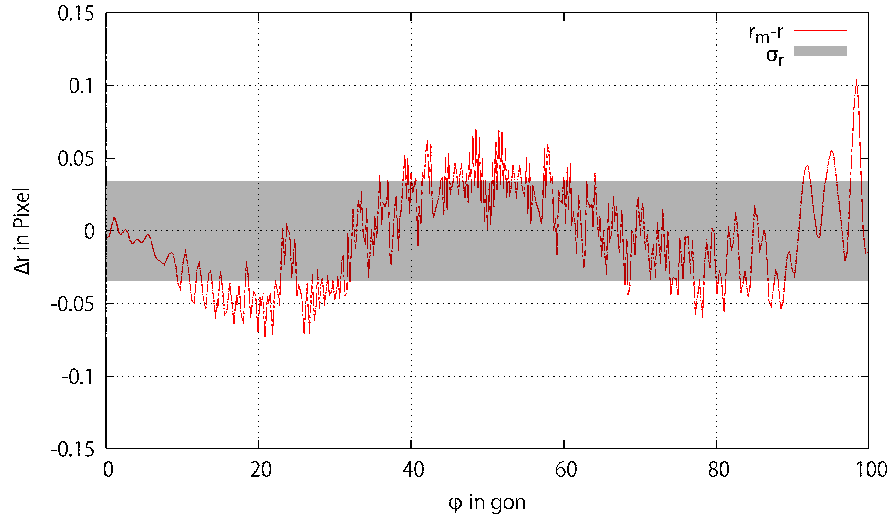


Abbildung 4.12: Subpixel-Genauigkeit des Canny-Operators in Abhängigkeit der Gradientenrichtung φ ($t_{low} = 100, t_{high} = 200, \sigma = 1$)

Die Genauigkeit der Kantenerkennung mit dem beschriebenen Verfahren entspricht der Zuordnungsgenauigkeit homologer Punkte in stereoskopischen Bildern (siehe Kap. 4.3.5). Die verbleibenden (systematischen) Fehler bei der Kantenlokalisierung lassen sich auf die räumlich begrenzte Wirkung der lokalen Faltungsoperatoren für Glättung und Richtungsableitung in diskreten Bilddaten zurückführen. Komplexere Ansätze zur Steigerung der Genauigkeit bei der Kantenextraktion finden sich u.a. in (STEGER, 1996) und (STEGER, 2000). In (NEDEVSKI u. a., 2006) wird zur Eliminierung des systematischen Fehleranteils eine stückweise lineare Approximation vorgeschlagen, wobei die Länge der Linienstücke von der Periode der Abweichungen (als Funktion ihrer Steigung) abhängt. Dieser Ansatz lässt sich jedoch nur für weitgehend gerade Kantenverläufe anwenden, in Bereichen mit starker Änderung der Kantenrichtung führt das Verfahren zu einer Verfälschung der detektierten Objektform.

4.4.3 Profilgesteuerte Kantenextraktion

Im Gegensatz zur flächenbasierten Extraktion von Kanten für eine ganze Bildregion werden bei der profilgesteuerten Kantenextraktion lediglich einzelne Kantenpunkte innerhalb von Grauwertprofilen quer zur Kantenrichtung detektiert. Die Kantenextraktion lässt sich somit auf die Analyse eindimensionaler Grauwertvektoren reduzieren. Lage und Richtung der Profile werden dabei durch interaktive Messung oder berechnete Bildkoordinaten näherungsweise vorgegeben.

Da Lage und Orientierung der Profile innerhalb des Bildes beliebig sein können, müssen die Grauwerte entlang der Profillinie zunächst über eine geeignete Interpolation (siehe Kap. 3.3.2.1) bestimmt werden. Zur Vermeidung von Fehlmessungen aufgrund von Bildrauschen

und anderen Störungen erfolgt anschließend eine Glättung unter Einbeziehung der zur Profillinie benachbarten Grauwerte mit einem zweidimensionalen Tiefpassfilter (siehe Kap. 4.1.2).

Zur Detektion einer *Linie* wird auf den geglätteten Bildvektor ein eindimensionales Ableitungsfiler angewandt (siehe Kap. 4.1.3). Die subpixelgenaue Lage der Linie innerhalb des Grauwertprofils ergibt sich dann aus der interpolierten Nullstelle der *ersten* Ableitung der Bildfunktion (siehe Abb. 4.13). Durch nochmalige Anwendung des Ableitungsfilters erhält man die *zweite* Ableitung der Bildfunktion, aus der sich wiederum durch Nullstellen-Interpolation die Lage einer *Kante* bestimmen lässt. Ausgehend von der Lage der Kante bzw. Linie in einem Profil sowie der näherungsweise vorgegebenen Richtung kann die Lage weiterer Profile über eine festgelegte Schrittweite extrapoliert werden. Mit diesem Vorgehen lassen sich einzelne Konturen gezielt erfassen, ohne dass über ein Ableitungsfiler eine ganze Bildregion untersucht werden muss.

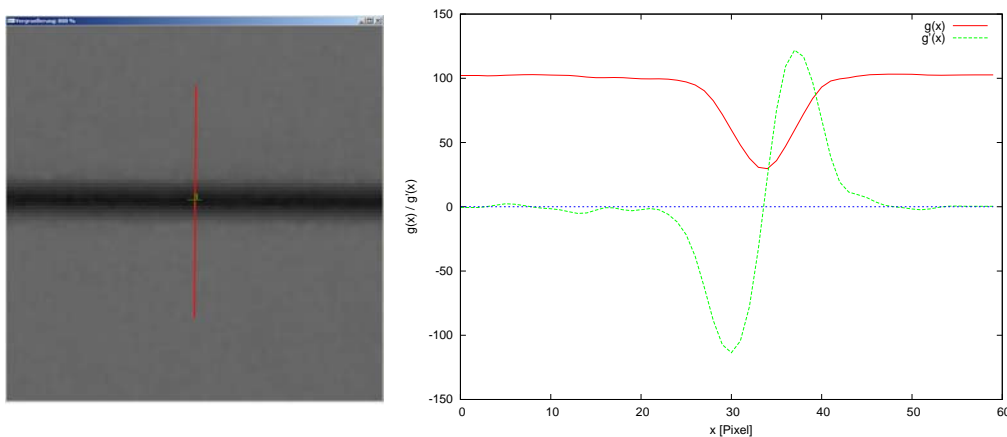
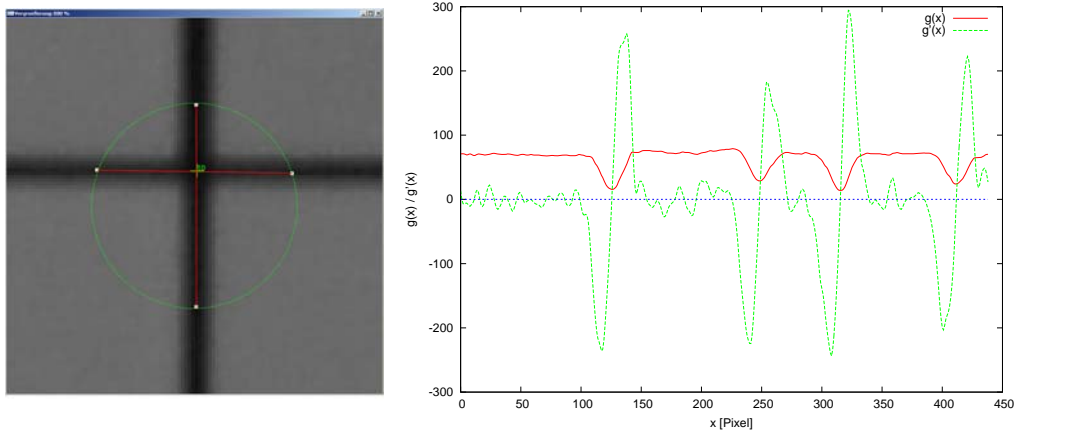


Abbildung 4.13: Lage des Profils im Bild (links) sowie zugehörige Grauwertfunktion $g(x)$ und deren erste Ableitung $g'(x)$

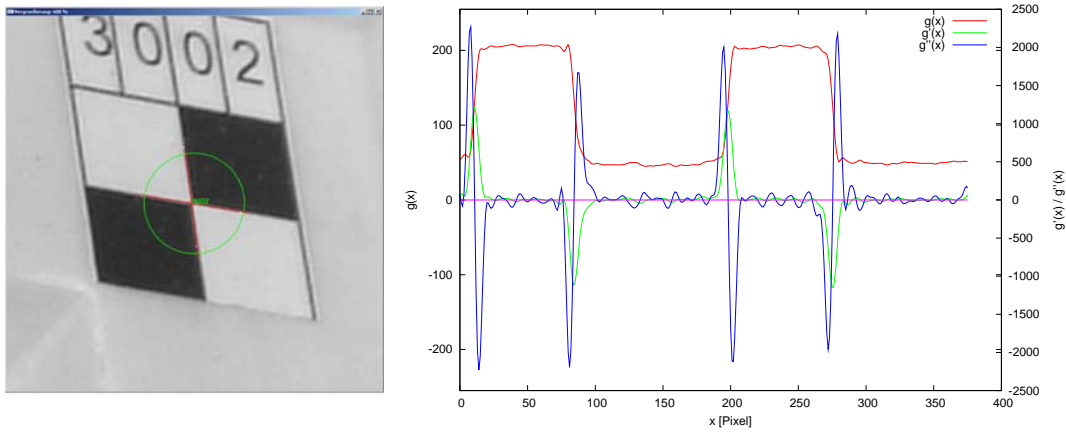
Neben der Detektion von Konturverläufen wird das beschriebene Verfahren in angepasster Form auch für die strukturelle Messung bestimmter Objekte verwendet. So können die Randpunkte kreis- oder ellipsenförmiger Objekte durch mehrere strahlenförmig verlaufende Profile, ausgehend von einem Näherungswert innerhalb des Objektes, oder durch parallel verlaufende Profile in Zeilen- und Spaltenrichtung bestimmt werden (LUHMANN, 2000). Zur Messung kreuzförmiger Muster (z.B. Réseaukreuze, Segmentmarken) werden die Grauwerte entlang kreisförmiger Profile um einen Näherungswert herum analysiert (Ring-Operator, siehe LUHMANN, 1986). Dabei erhält man für jedes Kreisprofil vier Nullstellen der ersten bzw. zweiten Ableitung, wobei sich der Mittelpunkt des Musters aus dem Schnitt der Verbindungslinien gegenüberliegender Nullstellen ergibt (siehe Abb. 4.14).

4.4.4 Hough-Transformation

Die Hough-Transformation (HOUGH, 1962; DUDA und HART, 1972) ist ein Verfahren zur globalen Detektion parametrisierbarer geometrischer Formen (z.B. Geraden, Kreise, Ellipsen) in binären Kantenbildern. Sie basiert auf der Forderung, dass alle Punkte einer analytischen Kurve durch den selben Parametersatz beschrieben werden müssen. Zur Erkennung



(a) Anwendung des Ring-Operators auf kreuzförmige Muster



(b) Anwendung des Ring-Operators auf Segmentmarke

Abbildung 4.14: Kreisförmiges Profil mit berechneten Nullstellen (links) sowie zugehörige Grauwertfunktion $g(x)$ und deren erste bzw. zweite Ableitung $g'(x)$ und $g''(x)$

geometrischer Objekte wird in Abhängigkeit der zu detektierenden Form ein diskreter Parameterraum definiert, dessen Dimension der Anzahl der zur Beschreibung der Geometrie notwendigen Parameterzahl entspricht.

Für die Detektion von Geraden wird ein zweidimensionaler, diskreter Parameterraum (Akkumulatormatrix) für die beiden Parameter r und φ der Geradengleichung in Hesse'scher Normalform

$$r = x \cos \varphi + y \sin \varphi \quad (4.32)$$

aufgespannt. Die Elemente dieser Akkulatormatrix werden mit Null initialisiert. Für jeden Kantenpunkt des zu untersuchenden Bildes ist aus dem Gradientenbild der Kantendetektion (siehe Abb. 4.3(d)) die Richtung $\varphi + 90^\circ$ des Kantenverlaufes bekannt, so dass mit Gleichung 4.32 auch r bestimmt werden kann. Der zugehörige Punkt (r, φ) wird in der Akkulatormatrix inkrementiert, d.h. um 1 erhöht. Da für alle Punkte einer Geraden die zugehörigen Parameter r und φ gleich sind, ergeben sich in der Akkulatormatrix lokale Maxima für jede Gerade des Kantenbildes.

Da das Verfahren auf der Transformation einzelner Kantenpunkte basiert, werden auch unterbrochene Kantenverläufe einer geometrischen Form bzw. unvollständig detektierte Objekte im Hough-Raum richtig zugeordnet. Damit ist das Verfahren sehr robust gegenüber Bildstörungen, Ungenauigkeiten in der Kantendetektion sowie Lücken in der Kantendetektion. Für die hier diskutierten Anwendungsbereiche hat das Verfahren jedoch nur eine untergeordnete Bedeutung, da die zu untersuchenden Objektstrukturen nur selten als einfache geometrische Formen approximiert werden können.

4.5 Kantenzuordnung

Mit der in Kapitel 4.3 beschriebenen flächenhaften Zuordnung von Bildpunkten können weitgehend stetige Objektoberflächen durch eine entsprechend hohe Dichte einzelner 3D-Punkte beschrieben werden. Zahlreiche Objekte weisen jedoch Unstetigkeiten in der Oberflächengeometrie auf, die als Grauwertkanten in den Bildern wiedergegeben werden. An diesen Unstetigkeitsstellen treten Probleme bei der klassischen flächenhaften Zuordnung auf, die zu einer Glättung der Objektkanten oder gar zu Fehlstellen bei der Punktzuordnung führen (siehe Abb. 4.7). Für eine möglichst vollständige Objekterfassung soll die punktweise Bestimmung stetiger Oberflächenbereiche daher um eine kantenbasierte Auswertung erweitert werden. Die Grundlage hierfür bildet das in Kapitel 4.4.2 vorgestellte Verfahren zur subpixelgenauen Extraktion von Grauwertkanten.

4.5.1 Linienbasierte Zuordnung

In der Literatur finden sich zahlreiche Ansätze für die Zuordnung gerader Kanten bzw. Kantensegmente. Aus den extrahierten Kantenpixeln werden dabei zunächst gerade Linien bzw. polygonale Kantenverläufe approximiert.

Eine sehr einfache Möglichkeit der Zuordnung von geraden Kantensegmenten ergibt sich durch den Vergleich der Kantenendpunkte unter Verwendung eines geeigneten Korrelationsverfahrens (Kap. 4.3). Aus den zugeordneten Endpunkten können dann sofort die 3D-Koordinaten der zugehörigen Kante im Objektraum berechnet werden. Voraussetzung ist jedoch die vollständige Extraktion der Kanten in allen beteiligten Bildern sowie eine identische Approximation der Kantensegmente. Aufgrund der verbleibenden Unsicherheiten bei der Kantenextraktion, die u.a. auf die unterschiedlichen Perspektiven bei der Aufnahme, Objektverdeckungen, Beleuchtungsunterschiede sowie Bildrauschen zurückzuführen sind, lässt sich das Verfahren jedoch nur unter kontrollierten Aufnahmebedingungen und für sehr einfache Objektgeometrien einsetzen (siehe z.B. HEMMLEB, 2002).

In der Regel erfolgt die Zuordnung über die Eigenschaften der Kanten (Länge, Orientierung, Richtung) sowie deren Lagebeziehungen zueinander (siehe z.B. ZHANG und BALTSAVIAS, 2000; HEMMLEB, 2002). Wissensbasierte Ansätze vereinfachen die Zuordnung von Kantensegmenten durch zusätzliche Informationen über die Objektgeometrie (ZLATANOVA und VAN DEN HEUVEL, 2002). Als Vorteile dieser linienbasierten Ansätze sind die geringere Zahl zuzuordnender Objekte (z.B. gegenüber einer pixelweisen Zuordnung) sowie die recht einfache und zuverlässige Zuordnung auf der Grundlage von Kanteneigenschaften zu nennen (FAUGERAS, 1993). Allerdings ergeben sich im Hinblick auf die in Kapitel 2 genannten Anforderungen entscheidende Nachteile der linienbasierten Zuordnung. Die Approximation der

extrahierten Kanten durch Liniensegmente setzt eine weitgehend polyedrische Objektgeometrie voraus. Um Approximationsfehler und einen damit einhergehenden Genauigkeitsverlust zu vermeiden, muss für unregelmäßige und stärker gekrümmte Objektstrukturen die Anzahl der Liniensegmente erhöht werden, wodurch der Aufwand für die Suche nach korrespondierenden Liniensegmenten ebenfalls ansteigt. Zudem wird die polygonale Approximation in der Regel unterschiedliche Ergebnisse in den beteiligten Bildern ergeben, so dass eine direkte Zuordnung von Liniensegmenten kaum möglich ist. Als Lösung wird in (FAUGERAS, 1993) die dynamische Anpassung einer der beiden Polygon-Approximationen aufgezeigt, was jedoch sehr aufwendig erscheint und der Forderung nach einer einfachen Zuordnung weniger Objekte entgegenläuft. Alternativ wird in (FAUGERAS, 1993) eine Approximation der Objektkonturen durch Kurven höheren Grades vorgeschlagen, wobei auf die komplexe Thematik der Kurven-Approximation nicht eingegangen wird.

In (LI, 1988) wird ein globaler Ansatz für die Zuordnung von Kantenelementen durch dynamische Programmierung vorgestellt. Zunächst werden unter Nutzung der Epipolarometrie (siehe Kap. 3.2.3) alle möglichen Zuordnungen von Liniensegmenten hergestellt. Anschließend erfolgt eine Bewertung der Zuordnungen basierend auf der *Unähnlichkeit* der Kanten, wobei als „Unähnlichkeitsmaße“ die Abweichungen der Grauwerte benachbarter Kanten, die Kantenrichtung sowie die Textureigenschaften in der Nähe der Kanten berücksichtigt werden. Auch dieses Verfahren basiert jedoch auf einer polygonalen Approximation der extrahierten Kanten und soll daher nicht weiter betrachtet werden.

4.5.2 Zuordnung über diskrete Kantenpunkte

Die Restriktionen hinsichtlich der Objektgeometrie bei einer linienbasierten Zuordnung sowie die komplexe Thematik einer für die Korrespondenzanalyse geeigneten Polygon-Approximation führen zu einer pragmatischen Lösung des Zuordnungsproblems unter Nutzung der extrahierten Kantenpunkte. Im Gegensatz zu (KITAMURA und YACHIDA, 1990) werden dabei jedoch nicht losgelöst die einzelnen Pixel der Kantenbilder zugeordnet, sondern es werden die zusammenhängenden Konturverläufe der in Kap. 4.4 beschriebenen Kantenextraktion verwendet. Ein entsprechender Ansatz zur stereoskopischen Echtzeit-Erfassung von Fahrbahnen findet sich in (NEDEVSKI u. a., 2006). Zunächst werden Konturen mit Subpixel-Genauigkeit entsprechend Kap. 4.4.2 in beiden Bildern getrennt extrahiert, wobei zusammengehörige Konturpunkte im Rahmen der Hysterese (siehe Kap. 4.4.1) als Punktketten gespeichert werden. Ausgehend vom Mittelpunkt einer Kontur im linken Bild werden entlang der Epipolarlinie (siehe Kap. 3.2.3) potentielle Kandidaten für eine Zuordnung im rechten Bild über eine flächenbasierte Korrelation (Kap. 4.3) gesucht. Für korrespondierende Konturen werden anschließend, ausgehend von den Konturpunkten im linken Bild, die zugehörigen Punkte im rechten Bild durch den Schnitt der Epipolarlinie mit der dortigen Kontur berechnet. Für schwach gekrümmte Konturen erfolgt hierfür eine lineare Interpolation zwischen benachbarten Konturpunkten, während für stärker gekrümmte Konturen eine Paraboloid-Anpassung vorgeschlagen wird. Aus den korrespondierenden Punktpaaren in beiden Bildern werden schließlich über Vorwärtsschnitt die zugehörigen Objektkoordinaten berechnet.

Aufgrund der speziellen Ausrichtung des Systems ergeben sich jedoch Einschränkungen hinsichtlich einer Übertragung des Verfahrens auf die hier diskutierten Anwendungsgebiete:

- Bei der Auswertung komplexerer Objektstrukturen kann nicht davon ausgegangen werden, dass Kanten in allen beteiligten Bildern vollständig extrahiert werden und dieselbe Topologie aufweisen. Die auf dem Mittelpunkt einer Kontur basierende Suche nach Kandidaten für eine Zuordnung kann damit scheitern bzw. liefert nicht alle zugehörigen Konturen im Bildpartner.
- Die Berechnung der korrespondierenden Punkte im rechten Bild erfolgt ausschließlich durch den Schnitt der Epipolarlinie mit der jeweiligen Kontur. Da eine zusätzliche Korrespondenzanalyse nicht erfolgt, führen Orientierungsfehler zu einer falschen Zuordnung und damit zu Fehlern in der Berechnung der Objektkoordinaten.
- Für kleine Winkel zwischen Epipolarlinie und Konturrichtung wird die Berechnung des Schnittpunktes sehr unsicher und es können sich ggf. mehrere Schnittpunkte innerhalb einer Kontur ergeben.
- Die Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten bei der Korrespondenzanalyse steigt quadratisch mit der Anzahl der extrahierten Merkmale (MAAS, 1997). Mit der verwendeten stereoskopischen Aufnahmekonfiguration lassen sich diese Mehrdeutigkeiten jedoch nicht lösen und können zu Fehlzuordnungen oder dem Ausfall von Merkmalszuordnungen führen.

Durch die folgenden Erweiterungen lässt sich ein angepasstes Verfahren für die Zuordnung diskreter Kantenpunkte entwickeln, das die genannten Einschränkungen (weitgehend) aufhebt:

- Es muss ein angepasstes Verfahren für die Suche nach korrespondierenden Konturkandidaten entwickelt werden, das u.a. die unterschiedlichen Topologien der extrahierten Konturen in den untersuchten Bildern berücksichtigt.
- Die zum linken Bild korrespondierenden Punkte werden zunächst näherungsweise durch den Schnitt der Epipolarlinie mit der Kontur im rechten Bild bestimmt. Anschließend wird jedoch die tatsächliche Position der besten Übereinstimmung *entlang* der Kontur durch eine auf der Grauwertumgebung der Kante basierende Zuordnung bestimmt. Hierzu muss eine entsprechende Anpassung der Kap. 4.3 vorgestellten Zuordnungsverfahren erfolgen. Durch diese zusätzliche Korrespondenzanalyse ist das Ergebnis der Zuordnung zudem nicht mehr abhängig vom Schnittwinkel zwischen Epipolarlinie und Konturrichtung im untersuchten Bild.
- Mehrdeutigkeiten bei der Merkmalszuordnung lassen sich durch eine erweiterte Drei- oder Vier-Kamera-Konfiguration entsprechend (MAAS, 1997) lösen. Die Korrespondenzanalyse muss damit auf drei bzw. vier Bilder erweitert werden. Auf die konkrete Realisierung einer erweiterten Vier-Kamera-Konfiguration und die entsprechende Bildorientierung wird in Kap. 5.2.2 bzw. 5.3 eingegangen.

4.5.3 Zuordnungsverfahren in einer Vier-Kamera-Konfiguration

Aufgrund der aufgeführten Probleme bei der linienbasierten Zuordnung, insbesondere hinsichtlich der zu erwartenden Approximationsfehler (Kap. 4.5.1), sollen die weiteren Untersuchungen auf die Zuordnung einzelner Konturen über diskrete Kantenpunkte beschränkt

werden. Hierfür wurde ein vereinfachtes Zuordnungsverfahren implementiert, bei dem die gefundenen Kantenpolygone interaktiv ausgewählt werden.

Die Grundlage für die Kantenzuordnung bilden die subpixelgenau extrahierten Kantenverläufe in den Aufnahmen einer Vier-Kamera-Konfiguration (Kap. 5.2.2). Durch diese Erweiterung der klassischen Stereokonfiguration lassen sich Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung deutlich verringern (MAAS, 1997). Die zu untersuchenden Kantenzüge werden in der Stereoansicht des Auswerteprogramms interaktiv vorgegeben, indem die Messmarke an einer beliebigen Position entlang der Kante „aufgesetzt“ wird. Die zur Position der Messmarke nächst gelegene Kante im jeweiligen Bild wird für die Zuordnung der einzelnen Kantenpunkte weiterverwendet.

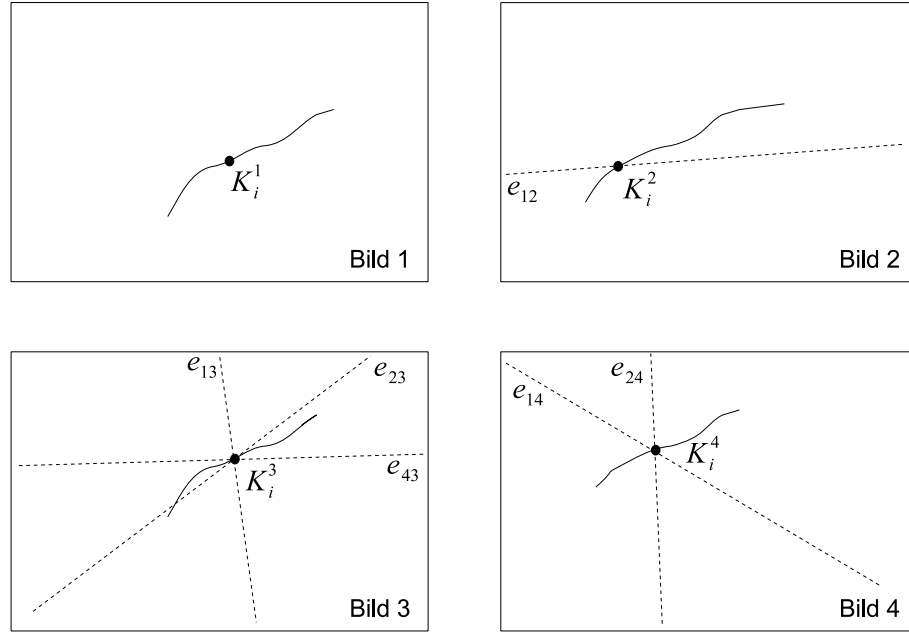


Abbildung 4.15: Kantenzuordnung in den Aufnahmen einer Vier-Kamera-Konfiguration

Ausgehend von den Kantenpunkten K_i^1 im ersten Bild (siehe Abb. 4.15) werden zunächst die zugehörigen Epipolarlinien e_{12} , e_{13} und e_{14} in den anderen drei Bildern berechnet. In Bild zwei wird für alle Punkte auf der Kontur, deren Abstand zur Epipolarlinie aus Bild eins kleiner als ein vorgegebener Abstand ist, der jeweilige Wert für den normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten berechnet. Als wahrscheinlichster Kandidat wird der Kantenpunkt K_i^2 mit dem höchsten Koeffizientenwert angenommen. Für diesen Kantenpunkt aus Bild zwei werden nun die Epipolarlinien e_{23} und e_{24} in den Bildern drei und vier berechnet. Anschließend wird für die Kantenpunkte in Bild vier der Abstand zu den Epipolarlinien e_{14} und e_{24} aus den Bildern eins und zwei berechnet. Ist dieser Abstand kleiner als ein vorgegebener Schwellwert, wird für den betreffenden Kantenpunkt die Epipolarlinie e_{43} in Bild drei berechnet. Damit ergeben sich in Bild drei die Epipolarlinien e_{13} , e_{23} und e_{43} aus den Bildern eins, zwei und vier. Für die Kantenpunkte in Bild drei wird nun der Abstand zu diesen drei Epipolarlinien berechnet. Ist dieser Abstand wiederum kleiner als ein vorgegebener Wert, ergibt sich ein Tupel aus vier zugehörigen Kantenpunkten $K_i^1 - K_i^4$ (Quadrupel). Die subpixelgenaue Zuordnung zwischen dem Ausgangspunkt K_i^1 in Bild eins und dem zugehörigen Konturpunkt K_i^2 in Bild zwei erfolgt schließlich über ein angepasstes Least-Squares-Matching (Kap. 4.3.4) entlang der extrahierten Kante.

4.5.4 Untersuchungsergebnisse und Fazit

Das implementierte Verfahren zur Zuordnung diskreter Kantenpunkte in einer Vier-Kamera-Konfiguration wurde anhand verschiedener Objekte aus den Bereichen Bauforschung und Archäologie untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass auch mit diesem Zuordnungsverfahren noch keine befriedigende Lösung für die Kantenzuordnung in natürlichen Objektszenen gefunden werden konnte.

Die Zuordnungsprobleme lassen sich dabei vor allem auf die Qualität der Kantenextraktion zurückführen. Für natürliche Objektszenen ergeben sich in Abhängigkeit von Perspektive, Beleuchtung und Abbildungsqualität in der Regel unterschiedliche Kantenverläufe in den beteiligten Aufnahmen (siehe Abb. 4.16). Häufig werden Kanten nur unvollständig extrahiert, wobei in den einzelnen Bildern jeweils unterschiedliche Kantensegmente erkannt werden. Eine Zuordnung ist dann nur für den in allen Aufnahmen gleichermaßen detektierten Kantenbereich möglich. Zum Teil werden Kanten in einzelnen Aufnahmen gar nicht erkannt, so dass die Zuordnungsstrategie auf drei oder gar zwei Bilder reduziert werden muss, was wiederum zu einem Anstieg von Fehlzuordnungen führt.

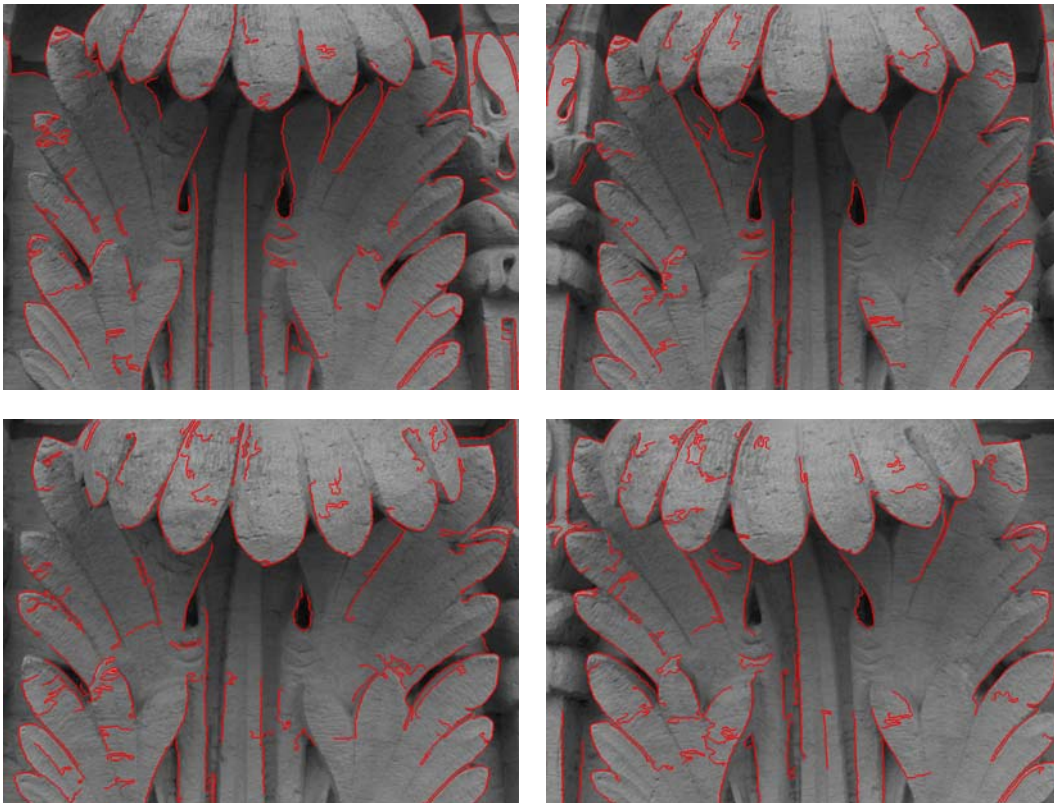


Abbildung 4.16: Unterschiede bei der Kantenextraktion mit Canny-Operator in den Aufnahmen einer Vier-Kamera-Konfiguration bei gleicher homogener Beleuchtung

Einen sehr großen Einfluss auf das Ergebnis der Kantenextraktion hat vor allem die Beleuchtung. Bei direkter, harter Beleuchtung (z.B. Sonnenschein bei Außenaufnahmen) werden zwar zahlreiche Kanten sehr deutlich hervorgehoben. Andererseits ergeben sich zusätzliche Kanten durch Schlagschatten, während abgeschattete Objektbereiche oft zu dunkel für eine weiter-

führende Analyse abgebildet werden. Die in der Photogrammetrie häufig bevorzugte diffuse Beleuchtung lässt zwar alle Objektbereiche gleichermaßen gut erkennen, der für die automatische Kantendetektion notwendige Kontrast an Unstetigkeiten ist häufig jedoch zu gering, so dass Kanten nicht oder nur unvollständig erkannt werden. Der Einfluss unterschiedlicher Beleuchtungsverhältnisse auf das Ergebnis der Kantenextraktion wird in Abbildung 4.17 besonders deutlich.

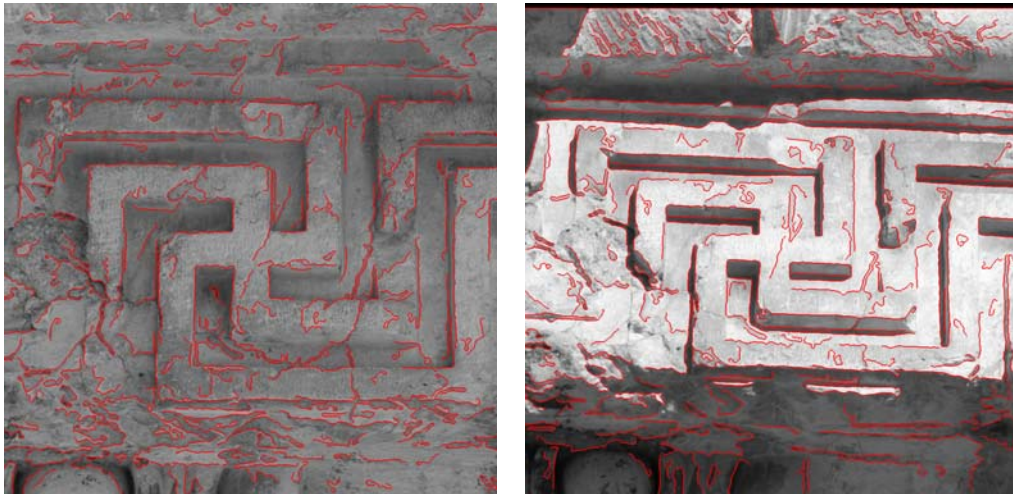


Abbildung 4.17: Unterschiede bei der Kantenextraktion mit Canny-Operator bei unterschiedlicher Beleuchtung

Für den in Abbildung 4.16 gezeigten Ausschnitt eines Kapitells wurde zusätzlich zur flächenhaften Auswertung über Bildzuordnung eine automatisierte Zuordnung von Kanten entsprechend Kapitel 4.5.3 durchgeführt. Dabei wurden nur Kanten ab einer Länge von 100 Pixeln berücksichtigt. Die Auswahl der Kanten für die automatische Zuordnung erfolgte interaktiv, so dass hier bewusst nur die Kantenzüge berücksichtigt wurden, die aufgrund einer entsprechenden Unstetigkeit der Objektoberfläche extrahiert wurden. Abbildung 4.18 zeigt dabei die Schwächen sowohl der flächenhaften als auch der kantenbasierten Auswertung. In texturarmen Bildbereichen scheitert die automatische Bildzuordnung und es ergeben sich Fehlstellen im Oberflächenmodell. Die zugeordneten Kanten ergeben aufgrund der unterschiedlichen Extraktionsergebnisse in den einzelnen Bildern nur ein lückenhaftes Kantenmodell des Objektes, das zudem durch falsch detektierte Strukturen gestört ist. Während sich Fehlstellen bei der flächenhaften Auswertung stetiger Oberflächen ggf. durch Interpolation aus den umliegenden Bereichen „füllen“ lassen, ist dies bei fehlenden Kanteninformationen nur für sehr kleine Lücken zwischen zwei sicher zugeordneten Kantenzügen möglich. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Zuordnung über diskrete Kantenpunkte nur für ausgesuchte Objekte und unter idealen Aufnahme- und Beleuchtungsbedingungen zuverlässig nutzbar ist. Im Gegensatz zur flächenbasierten Bildzuordnung kann die kantenbasierte Auswertung in den hier behandelten Anwendungsgebieten daher nur in Einzelfällen eingesetzt werden.

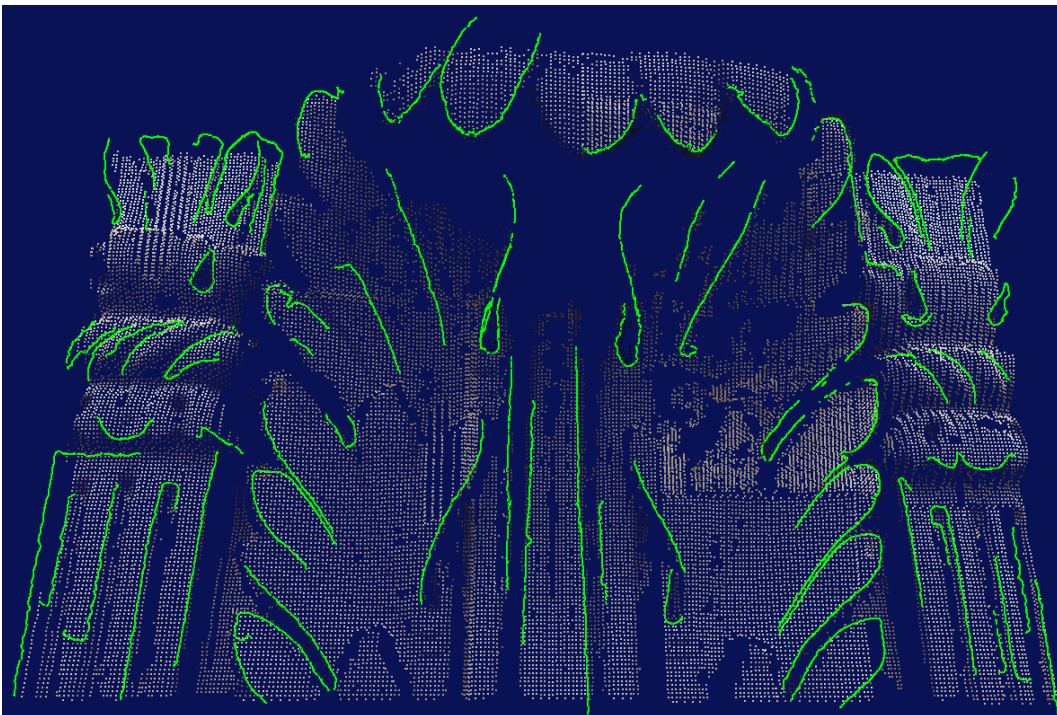


Abbildung 4.18: Ergebnis aus flächenhafter und kantenbasierter Auswertung einer Vier-Kamera-Konfiguration

5 Automatisierte Stereo- und Mehrbildauswertung

Mit Hilfe der Stereophotogrammetrie können nicht-ebene Objekte und Freiformoberflächen dreidimensional erfasst und auch zu einem späteren Zeitpunkt ausgewertet werden. Durch die Möglichkeit zur stereoskopischen Betrachtung kann das aufgenommene Objekt räumlich wahrgenommen werden und man erhält unmittelbar visuelle Informationen über Oberflächenzustand, Bearbeitungsqualität und Tiefengliederung. Über die in Kapitel 4 vorgestellten Verfahren der digitalen Bildverarbeitung lässt sich der Auswerteprozess darüber hinaus weitgehend automatisieren.

Trotz der aktuellen Entwicklungen im Bereich des terrestrischen Laserscannings hat die digitale Stereoauswertung nach wie vor besondere Bedeutung für die Objekterfassung in Archäologie, Bauforschung, Restaurierung und Denkmalpflege. Die Gründe hierfür sind u.a.:

- einfache, fest definierte Aufnahmekonfiguration
- Verwendung digitaler Amateurkameras
- überschaubare und weitgehend automatisierbare Bildorientierung
- einfache interaktive Auswertung mit Unterstützung durch automatisierte Messverfahren
- automatisierte Auswertung von Freiformoberflächen und nicht markierten Objektpunkten
- Möglichkeit der visuellen Kontrolle und weiterführenden Objektanalyse durch stereoskopische Betrachtung
- hohes Genauigkeitspotential

Das Verfahren steht damit ganz bewusst auch im Gegensatz zu Mehrbildverfahren aus dem Bereich der industriellen Photogrammetrie, bei denen zumeist (wenige) diskrete, durch spezielle Passmarken gekennzeichnete Objektpunkte mit einer sehr hohen Genauigkeit vollautomatisch erfasst und ausgewertet werden. In der Regel kommen hierfür Messsysteme zum Einsatz, die u.a. hinsichtlich Objektform und -größe, Beleuchtung und Genauigkeitsvorgaben auf die konkreten Anforderungen angepasst und optimiert sind.

Im Gegensatz zur projektiven Entzerrung müssen jedoch für eine photogrammetrische 3D-Auswertung die Orientierungen und Kameraparameter aller beteiligten Bilder bekannt sein. Die Berechnung der Orientierungsparameter kann durch räumlichen Rückwärtsschnitt einzelner Bilder, eine relative Orientierung mehrerer Bilder oder durch Bündelausgleichung eines Bildverbandes erfolgen. Die Kameraparameter werden entweder im Rahmen einer von der eigentlichen Objektaufnahme losgelösten Kalibrierung bestimmt, sie können bei geeigneter Aufnahmekonfiguration aber auch im Zuge der Bildorientierung mit berechnet werden.

5.1 Einsatz nicht-metrischer Kameras

Die Verfügbarkeit hochauflösender digitaler Amateurkameras hat, zusammen mit den Entwicklungen im Bereich der analytischen und digitalen Photogrammetrie (angepasste Kalibrierverfahren, erweiterte Kameramodelle und automatische Auswerteverfahren), zu einer weitgehenden Verdrängung spezieller Messkameras in der Nahbereichsphotogrammetrie geführt. Digitale Amateurkameras ermöglichen flexible und preiswerte Aufnahmesysteme, deren Anwendungsspektrum von der einfachen Fassadenentzerrung bis hin zur hochgenauen Industriephotogrammetrie reicht. Bereits in (MAAS, 1998) werden sie daher als „Arbeitspferde der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie“ bezeichnet.

Die prinzipielle Eignung nicht-metrischer Digitalkameras für die photogrammetrische Aufnahme wurde u.a. in (LÄBE und FÖRSTNER, 2004) und (SHORTIS u. a., 2006), mit zahlreichen Verweisen auf weitere Untersuchungen, nachgewiesen. Voraussetzung für die Nutzung nicht-metrischer Kameras in der Photogrammetrie ist jedoch eine (regelmäßige) Kalibrierung des Aufnahmesystems zur Bestimmung der inneren Orientierung sowie zusätzlicher Kameraparameter. Verschiedene Verfahren zur Kalibrierung nicht-metrischer Kameras finden sich u.a. in (FRYER, 1996; LUHMANN, 2000) und (REMONDINO und FRASER, 2006). Im Gegensatz zu klassischen Mess- und Teilmesskamern kann die innere Orientierung digitaler Amateurkameras jedoch nicht als konstant angesehen werden (MAAS und NIEDERÖST, 1997), so dass angepasste Verfahren für die Bestimmung der variablen Kameraparameter zum Einsatz kommen müssen (siehe z.B. MAAS, 1998).

Obwohl es auch Ansätze zur Kalibrierung von Zoom-Objektiven gibt (WILEY und WONG, 1992; FRASER und AL-AJLOUNI, 2006), zeigen verschiedene Untersuchungen, dass die innere Orientierung der meisten Zoom-Optiken sehr instabil ist und sich entsprechende Kamerasysteme nur eingeschränkt für die photogrammetrische Aufnahme eignen (FRYER, 1996; LÄBE und FÖRSTNER, 2004; SHORTIS u. a., 2006). Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich daher in der Regel auf die Verwendung von Objektiven mit fester Brennweite und definierten Einstellungen für die Fokussierung.

Die für die Nutzung in einem Stereoauswertesystem relevanten Ansätze zur Bestimmung der Kameraparameter sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

5.1.1 Verzeichnungs Korrektur

Die in Kapitel 3.3.2.2 vorgestellte Bildentzerrung beschreibt die zentralprojektive Transformation zwischen der Objekt- und der Bildebene ohne Berücksichtigung von Abbildungsfehlern der verwendeten Kamera. Damit werden insbesondere die bei einfachen Amateurkameras z.T. deutlich sichtbaren Objektivverzeichnungen in das entzerrte Bild übertragen und führen zu einem entsprechenden Lageversatz bei der Auswertung. Ein einfaches Verfahren zur Bestimmung der Verzeichnungsparameter wird in (BROWN, 1971) vorgestellt. Der als Plumbline-Kalibrierung bezeichnete Ansatz geht davon aus, dass bei einer zentralperspektiven Abbildung Objektgeraden auch im Bild als Geraden wiedergegeben werden. Damit lassen sich die Parameter der Objektivverzerrung durch Messung der im verzeichneten Bild gekrümmt abgebildeten Objektgeraden bestimmen. Die Koordinaten des Bildhauptpunktes

lassen sich zwar ebenfalls ermitteln, eine zuverlässige Bestimmung gelingt jedoch nur für Optiken mit sehr großen Verzeichnungen (z.B. Superweitwinkel- oder Fisheye-Objektive; FRYER, 1996).

Der funktionale Zusammenhang für die Berechnung der Verzeichnungsparameter ergibt sich aus folgender Geradendarstellung:

$$x'_{ij} \sin \theta_i + y'_{ij} \cos \theta_i = \rho_i \quad (5.1)$$

wobei ρ_i der Abstand der Linie i vom Koordinatenursprung und θ_i der Richtungswinkel zwischen y-Achse und der Normalen zur Gerade i durch den Ursprung des Koordinatensystems ist. x'_{ij} und y'_{ij} sind die, entsprechend Gleichung 3.5 korrigierten, Bildkoordinaten der gemessenen Geradenpunkte:

$$x' = x_P - x_H + \Delta x_{rad} + \Delta x_{dez} \quad \text{und} \quad y' = y_P - y_H + \Delta y_{rad} + \Delta y_{dez} \quad (5.2)$$

mit den Korrekturtermen für die radial-symmetrische Verzeichnung Δx_{rad} , Δy_{rad} und die radial-asymmetrische und tangentielle Verzeichnung Δx_{dez} , Δy_{dez} .

Für jeden auf einer Geraden i gemessenen Punkt j erhält man damit eine Beobachtungsgleichung der Form:

$$f(x'_{ij}, y'_{ij}; x_H, y_H, A_1, A_2, A_3, B_1, B_2; \theta_i, \rho_i) = 0 \quad (5.3)$$

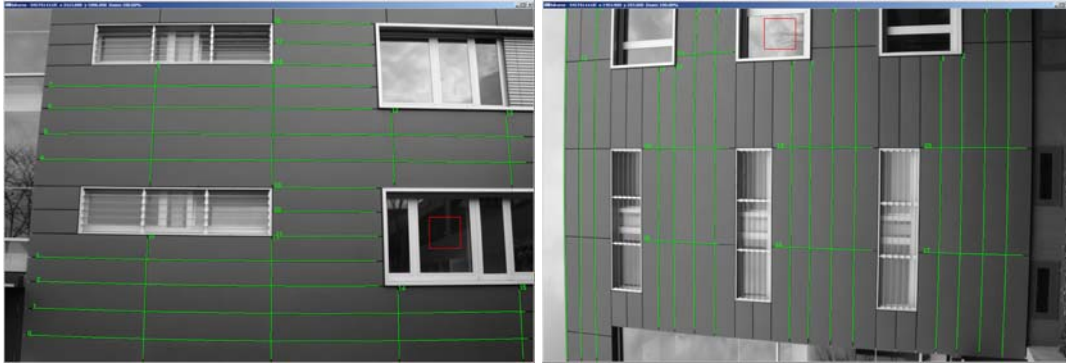
und die sich daraus ergebenden Differentialquotienten für eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen:

$$\frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial (x_H, y_H, A_1, A_2, A_3, B_1, B_2)} \quad (\text{für jede Kamera}), \quad \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial (\theta_i, \rho_i)} \quad (\text{für jede Gerade}) \quad (5.4)$$

Bei der Verwendung von Objektiven mit fester Brennweite können die Verzeichnungsparameter im Rahmen der üblichen Genauigkeitsanforderungen bei der projektiven Entzerrung als konstant angesehen werden (FRYER, 1996). Gleiches gilt auch für Objektive mit fest einstellbaren und reproduzierbaren Zoomstufen. Die Verzeichnungsparameter für ein Objektiv bzw. eine bestimmte Zoomeinstellung lassen sich damit im Vorfeld der eigentlichen Objektaufnahmen bestimmen. Hierzu wird ein geeignetes Objekt bzw. Motiv mit möglichst vielen und langen Objektgeraden aufgenommen, wobei auf eine gleichmäßige Abdeckung des gesamten Bildbereiches durch sowohl horizontal als auch vertikal verlaufende Geraden zu achten ist. Gegebenenfalls können hierfür mehrere jeweils gekantete Aufnahmen (90° Drehung um die Aufnahmeachse) des Objektes bei gleicher Objektiveinstellung verwendet werden (siehe Abb. 5.1). Neben natürlichen Objekten, z.B. Gebäudefassaden, eignen sich für die Plumblinie-Kalibrierung auch ausgedruckte bzw. gezeichnete Linienmuster oder am Objekt angebrachte Lote.

Die Messung der Geraden im Bild lässt sich bei geeigneten Objektstrukturen durch eine Konturverfolgung (siehe Kap. 4.4.3) weitgehend automatisieren. Zum einen erhöht sich damit die Messgenauigkeit der einzelnen Punkte, zum anderen wird innerhalb sehr kurzer Zeit eine sehr große Punktzahl pro Linie gemessen. Liegen keine Informationen zur Sensorgröße der Kamera vor, beziehen sich die Verzeichnungsparameter zunächst auf das Pixelkoordinatensystem des digitalen Bildes. Über die Auflösung und Größe des Kamerasensors können diese Parameter in das metrische Bildkoordinatensystem umgerechnet werden.

Abbildung 5.1 zeigt zwei um 100 gon zueinander gekantete Fassadenaufnahmen mit deutlich sichtbarer tonnenförmiger Verzeichnung. Die Geraden wurden getrennt in beiden Bildern über Konturverfolgung automatisiert gemessen. Da beide Aufnahmen mit der gleichen Objektiveinstellung erstellt wurden, erfolgte die Berechnung der Verzeichnungsparameter durch Kombination der Messungen aus beiden Bildern.



(a) verzeichnete Bilder mit automatisiert gemessenen Geraden



(b) korrigierte Bilder

Abbildung 5.1: Verzeichnungskorrektur über Plumblin-Kalibrierung

Neben der Bestimmung der Verzeichnungs-Parameter für eine Bildkorrektur bei der projektiven Entzerrung kann die Plumblin-Kalibrierung darüber hinaus als erster Schritt einer getrennten Bestimmung von Abbildungsfehlern und Parametern der inneren Orientierung verwendet werden (siehe Kap. 5.1.3). Die Verzeichnungs-Parameter werden dabei als konstante Größen in die Berechnung der inneren Orientierung (c_K, x_H, y_H) eingeführt.

5.1.2 Kamerakalibrierung

Die gleichzeitige Bestimmung von innerer Orientierung und zusätzlichen Parametern erfolgt im Rahmen einer Kamerakalibrierung. In der Literatur werden hier verschiedene Verfahren unterschieden (LUHMANN, 2000):

- Laborkalibrierung: die Kameraparameter werden mit opto-mechanischen Messgeräten (Goniometer, Kollimator) im Labor bestimmt

- Testfeldkalibrierung: aus den Aufnahmen eines signalisierten Objektpunktfeldes werden die Kameraparameter durch Bündelblockausgleichung berechnet
- Simultankalibrierung: die Kameraparameter werden im Zuge der Bildorientierung für die Objektauswertung mitbestimmt

Für die praktische Nutzung in einem flexibel einsetzbaren Stereoaufnahmesystem scheiden Labor- und Testfeldkalibrierung in der Regel aus. Für die Erfassung unterschiedlicher Objekte müssen ggf. Fokussierung und Brennweite (Zoom) angepasst werden und es wird oft mit verschiedenen Wechselobjektiven gearbeitet. Aufgrund der instabilen inneren Orientierung eines solchen Aufnahmesystems kann dabei nicht davon ausgegangen werden, dass die Parameter einer vorangegangenen Kalibrierung (vollständig) für spätere Aufnahmen übernommen werden können (KOTOWSKI, 1985).

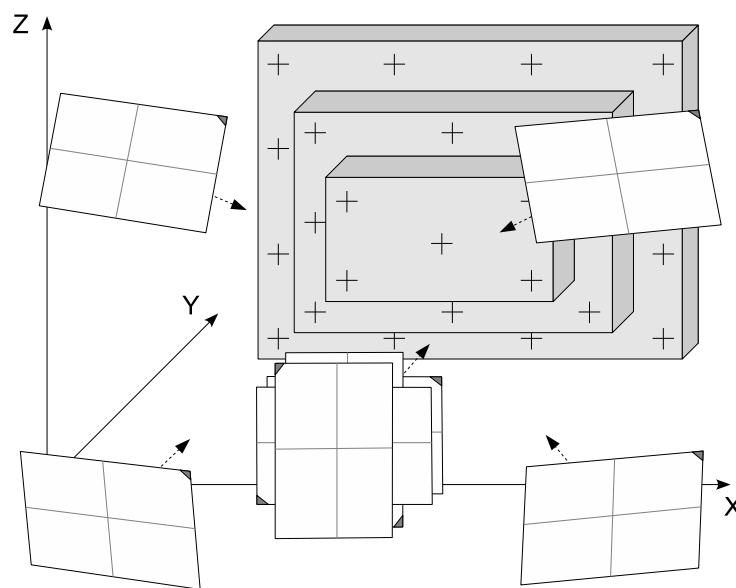


Abbildung 5.2: Aufnahmekonfiguration für eine Feldkalibrierung

Die Kalibrierung erfolgt daher zweckmäßigerweise direkt vor Ort im Vorfeld der eigentlichen Objekterfassung *in Anlehnung* an eine Testfeldkalibrierung (*On-the-job Kalibrierung*, FRYER, 1996). An einem geeigneten Objekt sind hierfür Passinformationen in Form von Strecken oder Passpunkten zu bestimmen und ggf. auch zu markieren. Die Aufnahmeanordnung lässt sich z.B. aus den in (WESTER-EBBINGHAUS, 1985b) gemachten Ausführungen ableiten:

- für die Bestimmung der Kamerakonstante werden vier konvergente Schrägaufnahmen des Objektes erstellt
- darüber hinaus werden für eine zuverlässige Bestimmung des Bildhauptpunktes und zusätzlicher Affinitätsparameter vier jeweils um 90° gekantete Frontalaufnahmen benötigt (siehe Abb. 5.2)

Die Berechnung der Kamera- und Verzeichnungsparameter erfolgt anschließend durch eine Bündelblockausgleichung (Kap. 3.2.6).

Im Zuge der Kalibrierung eines Aufnahmesystems, bestehend aus Kamera und Wechselobjektiv, können die Werte für Kamerakonstante und Bildhauptpunkt für weitere Fokuseinstellungen

gen durch eine vereinfachte Aufnahmekonfiguration mitbestimmt werden. Bei ausreichender Tiefengliederung des Kalibrierobjektes reichen hierfür die Aufnahmen eines Stereobildpaares aus (WESTER-EBBINGHAUS, 1985b; GODDING, 1999). Zur Stabilisierung der Berechnung sollten jedoch zwei weitere konvergente Aufnahmen ergänzt werden. Abbildung 5.3 zeigt die Aufnahmen zur Feldkalibrierung einer digitalen Spiegelreflexkamera mit Festbrennweitenobjektiv für zwei unterschiedliche Fokuseinstellungen. Über die oberen neun Aufnahmen wurden für eine Fokussierung auf unendlich die innere Orientierung (c_K, x_H, y_H) sowie die Verzeichnungsparameter (A_1, A_2) bestimmt. Anschließend wurden über vier weitere Aufnahmen die geänderten Parameter von Kamerakonstante und Bildhauptpunkt für eine Fokussierung auf 2 m berechnet. Die Verzeichnungsparameter wurden dabei aus der Berechnung für die erste Fokuseinstellung übernommen und können im Rahmen der hier geforderten Genauigkeiten als konstant angesehen werden (FRYER, 1996). Als Kalibrierobjekt diente ein ca. 3,6 m breiter und 2,5 m hoher Geison-Block des Jupiter-Tempels in Baalbek, auf dem als Maßstabsreferenz markante Punkte tachymetrisch bestimmt wurden.

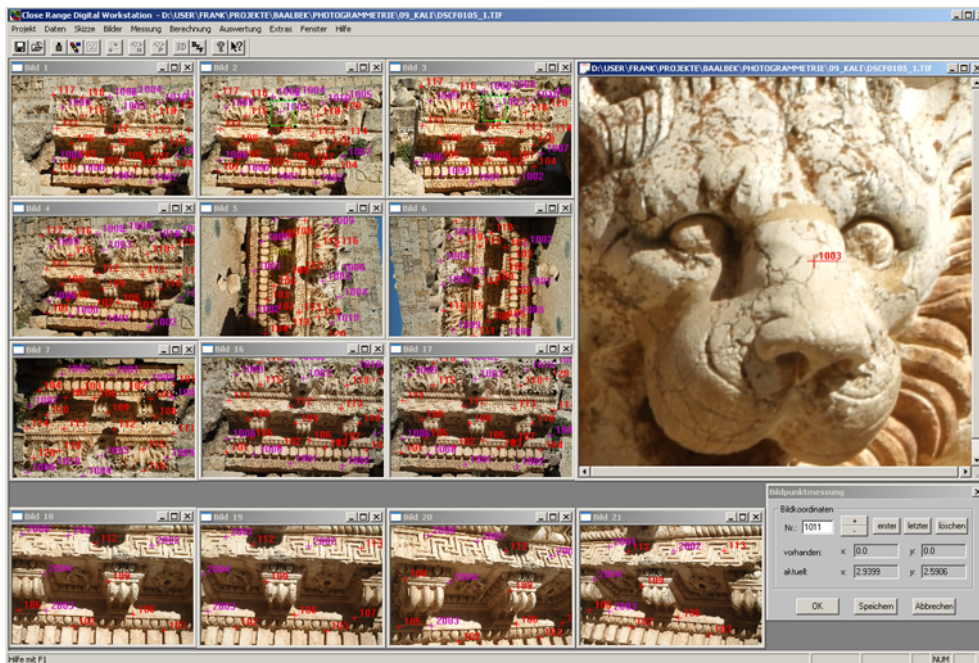


Abbildung 5.3: Aufnahmen zur Feldkalibrierung einer Amateurkamera für zwei unterschiedliche Fokuseinstellungen

Insbesondere für die Erfassung kleinerer Objekte mit einer maximalen Ausdehnung < 1 m bietet sich die Verwendung eines transportablen Kalibrierkörpers zur Bestimmung der inneren Orientierung an (Abb. 5.4). Die Referenzinformationen werden dabei durch räumlich angeordnete Maßstäbe oder die 3D-Koordinaten markierter Passpunkte auf dem Körper definiert. In der Regel wird der Kalibrierkörper zusammen mit dem eigentlichen Messobjekt aufgenommen, so dass ggf. auch für einzelne Aufnahmen eine (erneute) Kalibrierung erfolgen kann.

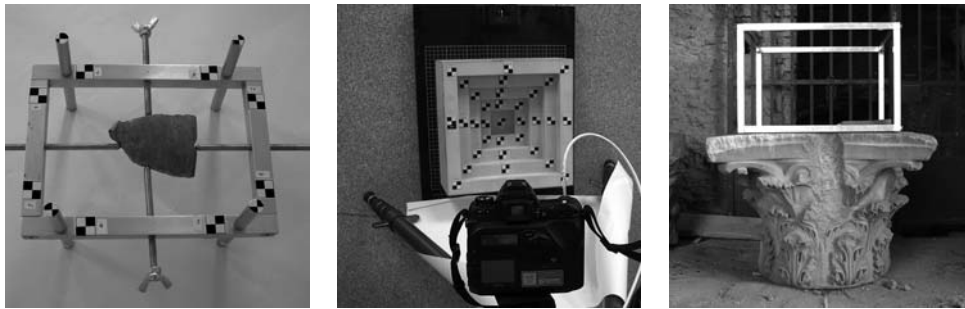


Abbildung 5.4: Kalibrierkörper für unterschiedliche Objektgrößen und Anwendungsgebiete

5.1.3 Kombiniertes Verfahren

Für eine vollständige Kamerakalibrierung entsprechend Kap. 5.1.2, unter Berücksichtigung verschiedener Objektive und Fokuseinstellungen sowie zusätzlicher Verzeichnungs-Parameter, müssen in allen beteiligten Bildern hinreichend viele Verknüpfungspunkte gemessen werden. Effizient lässt sich dies nur durch automatische Messung codierter Passmarken mit Hilfe spezieller Software für die Mehrbildorientierung realisieren. Demgegenüber ist eine interaktive Messung der Bildpunkte sehr zeitaufwändig und birgt ein erhöhtes Risiko für Fehlmessungen und Falschzuordnungen. Eine vollständige Kamerakalibrierung erfolgt daher in der Regel an Testfeldern bzw. in Kalibrierräumen und wird durch spezialisierte Firmen oder Institute als Dienstleistung angeboten. Bei der Verwendung von Amateurkameras können die durch eine Kalibrierung ermittelten Parameter der inneren Orientierung (c_K, x_H, y_H) jedoch nicht als stabil angesehen werden, sondern sind ggf. vor jeder Messkampagne erneut zu bestimmen (MAAS und NIEDERÖST, 1997).

Aus diesem Grund wird für die Bestimmung der Kameraparameter in einem anwenderorientierten Stereoaufnahmesystem ein angepasstes zweistufiges Verfahren vorgeschlagen:

1. Zunächst werden über eine Testfeldkalibrierung die Parameter der inneren Orientierung zusammen mit den Verzeichnungsparametern und den Parametern für Affinität und Scherung für definierte und wiederherstellbare Fokuseinstellungen (i.d.R. unendlich) bestimmt.
2. Vor jeder Messkampagne werden Kamerakonstante und Bildhauptpunkt für die jeweils verwendete Fokuseinstellung durch eine vereinfachte Aufnahmekonfiguration vor Ort neu bestimmt (siehe Kap. 5.1.2). Die Parameter für Verzerrung sowie Affinität und Scherung werden dabei aus den Ergebnissen der Testfeldkalibrierung als bekannte Größen übernommen.

Da die Verzeichnungsparameter abhängig von der jeweiligen Fokuseinstellung sind, stellt dieses Vorgehen einen Kompromiss zwischen dem Aufwand für die Vor-Ort-Bestimmung der Kameraparameter und der zu erreichenden Genauigkeit für die Objekterfassung dar. Eine fokusabhängige Bestimmung der Verzeichnungsparameter wird erst für hochgenaue Anwendungen im Nahbereich bei sehr großen Tiefenunterschieden im Objektraum notwendig (FRYER, 1996).

5.1.4 Untersuchungsergebnisse

Die vorgestellten Verfahren zur Kamerakalibrierung wurden im Rahmen unterschiedlicher Projekte exemplarisch für ein Aufnahmesystem, bestehend aus einer digitalen Spiegelreflexkamera Fuji FinePix S2 Pro mit 35 mm Festbrennweitenobjektiv AF Nikkor 35 mm/2,0 D, untersucht. Im Vordergrund stand dabei die Beschaffung von Kameraparametern für den konkreten Anwendungsfall. Da die Kamera für zahlreiche Aufnahmeprojekte, auch mit anderen Objektiven, regelmäßig genutzt wird, kommen dabei in der Regel vereinfachte Verfahren zur Kalibrierung zum Einsatz, die an die jeweiligen Projektanforderungen sowie an die Bedingungen vor Ort angepasst werden müssen. Regelmäßige Testfeldkalibrierungen unter idealen Bedingungen wurden aufgrund der instabilen inneren Orientierung des Aufnahmesystems nicht durchgeführt.

2005: Im September 2005 wurden die Parameter der inneren Orientierung sowie die Verzeichnungs-Parameter und zusätzlich Parameter für Affinität und Scherung für das genannte Aufnahmesystem durch eine Kalibrierung vor Ort bestimmt. Die Aufnahmekonfiguration für die Kalibrierung auf die Fokuseinstellung unendlich (Anschlag) entsprach Abb. 5.2. Anschließend wurden ein Stereobildpaar sowie zwei weitere, konvergente Aufnahmen für eine Fokussierung auf 2 m erstellt (siehe Abb. 5.3). Als Referenz wurden am Objekt insgesamt 20 Passpunkte tachymetrisch bestimmt. Für die Berechnung mit dem Mehrbildauswertesystem Rollei CDW 2.1 wurden die Bildkoordinaten der Pass- und Verknüpfungspunkte manuell gemessen. Die Messgenauigkeit wurde auf 0,005 mm (entspr. 1 Pixel) festgelegt. Die Bestimmung der Kameraparameter ($c_K, x_H, y_H, A_1, A_2, C_1, C_2$) für die Fokussierung auf unendlich erfolgte durch eine freie Netzausgleichung, wobei vier Passpunkte als Systemfestlegung dienten. Anschließend wurden Bildhauptpunkt und Kamerakonstante für die Fokussierung auf 2 m berechnet, die Parameter für Verzerrung sowie Affinität und Scherung wurden aus der ersten Berechnung als konstante Größen übernommen.

2006: Zur Bestimmung der Verzerrungsparameter A_1 und A_2 über eine Plumblinie-Kalibrierung wurden zwei um 100 gon zueinander gekantete Aufnahmen einer Hausfassade entsprechend Abbildung 5.1 erfasst. Die Messung der Linien in den Bildern erfolgte automatisiert durch Konturverfolgung (Kap. 4.4.3). Aufgrund der geringen Verzerrung des Objektivs konnten die Koordinaten des Bildhauptpunktes nicht sicher berechnet werden.

2007: Im Rahmen einer Bachelorarbeit (REICH und DROTT, 2007) wurden die Kameraparameter des Aufnahmesystems über eine Testfeldkalibrierung mit ebener Kalibrierplatte für die Fokussierungen auf 2 m und unendlich erneut bestimmt. Hierfür wurden 6 Schrägaufnahmen sowie zusätzlich vier um jeweils 90° zueinander gekantete Frontalaufnahmen der Kalibrierplatte erstellt. Die automatische Messung der kodierten Zielmarken sowie die Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung erfolgten mit der Software Pictran (www.technet-gmbh.de). Genauigkeitsangaben zu dieser Kalibrierung liegen jedoch nicht vor.

2008: In einer weiteren Messkampagne im Jahr 2008 wurden mit derselben Kamera-Objektiv-Kombination zunächst vier konvergente Stereobildpaare für eine vereinfachte Bestimmung von Bildhauptpunkt und Kamerakonstante vor Ort für eine Fokussierung auf unendlich erstellt. Über zwei weitere Stereobildpaare, die entsprechend der in Kap.

5.2.2 vorgestellten Vier-Kamera-Konfiguration angeordnet waren, sollte die innere Orientierung für eine Fokussierung auf 2 m ermittelt werden. Wiederum dienten tachymetrisch bestimmte Passpunkte als Objektreferenz. Die Berechnung erfolgte zunächst analog der ersten Bestimmung über Rollei CDW 2.1 auf der Basis manuell gemessener Bildkoordinaten für Pass- und Verknüpfungspunkte. Für beide Fokuseinstellungen wurden die Parameter für Verzeichnung sowie Affinität und Scherung aus den Ergebnissen der ersten Kalibrierung 2005 übernommen.

2008 a: Ergänzend wurden in den Aufnahmen von Vier-Kamera-Konfigurationen getrennt für beide Fokuseinstellungen über einen Interest-Operator (Kap. 4.2) mit anschließender Bildzuordnung automatisiert homologe Punkte gemessen. Als Objektreferenz wurden lediglich die bekannten Basisabstände (Fokus ∞ : 600 mm, Fokus 2 m: 300 mm) zwischen den beiden Kamerastandorten der jeweils ersten Stereobasis eingeführt. Die Bestimmung der inneren und äußeren Orientierung für die vier Aufnahmen eines Stereomodells erfolgte durch freie Netzausgleichung unter Verwendung der *lsrplib* (Kap. A.1), Näherungswerte für die Berechnung wurden über eine relative Orientierung des jeweils ersten Stereobildpaares ermittelt.

In Tabelle 5.1 sind die ermittelten Kameraparameter aller Berechnungen zusammengefasst. Zusätzlich sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Kalibrierungen in Abb. 5.5 grafisch dargestellt.

(a) Fokussierung ∞

	2005	2007	2008	2008 a
c_K [mm]	36.280 ± 0.066	36.337	36.073 ± 0.029	36.612 ± 0.003
x_H [mm]	0.060 ± 0.014	0.106	0.040 ± 0.010	-0.070 ± 0.010
y_H [mm]	0.046 ± 0.017	0.060	0.122 ± 0.016	0.175 ± 0.032

(b) Fokussierung 2 m

	2005	2007	2008	2008 a
c_K [mm]	36.570 ± 0.078	36.806	36.362 ± 0.075	36.771 ± 0.012
x_H [mm]	0.099 ± 0.035	0.100	0.126 ± 0.022	0.021 ± 0.018
y_H [mm]	0.126 ± 0.067	0.042	0.277 ± 0.083	0.175 ± 0.038

(c) Verzeichnung, Affinität/Scherung

	2005: Kali. ∞	2006: Plumbl.	2007: Kali. ∞
A_1	$-5.410\text{E-}05 \pm 6.315\text{E-}06$	$-8.876\text{E-}05 \pm 1.503\text{E-}6$	$-6.604\text{E-}05$
A_2	$6.256\text{E-}08 \pm 3.250\text{E-}08$	$2.023\text{E-}07 \pm 9.206\text{E-}09$	$6.319\text{E-}08$
C_1	$-7.358\text{E-}03 \pm 1.555\text{E-}04$	-	-
C_2	$-5.104\text{E-}04 \pm 1.391\text{E-}04$	-	-

Tabelle 5.1: Ergebnisse unterschiedlicher Kamerakalibrierungen für eine Digitalkamera Fuji FinePix S2 Pro mit AF Nikkor 35 mm/2,0 D

Der Vergleich der Kameraparameter zeigt, dass die Ergebnisse einer Kalibrierung u.a. stark abhängig sind von der Aufnahmekonfiguration, von der Verteilung der Pass- und Verknüpfungspunkte sowie von der Genauigkeit der Bildkoordinatenmessung (autom. / manuell). Hinzu kommt die bereits angesprochene Instabilität der inneren Orientierung bei Amateurkameras mit Wechselobjektiven. Aufgrund der vielen Einflussfaktoren sind die Ergebnisse einer Kalibrierung daher nur schlecht reproduzierbar (siehe MAAS und NIEDERÖST, 1997)

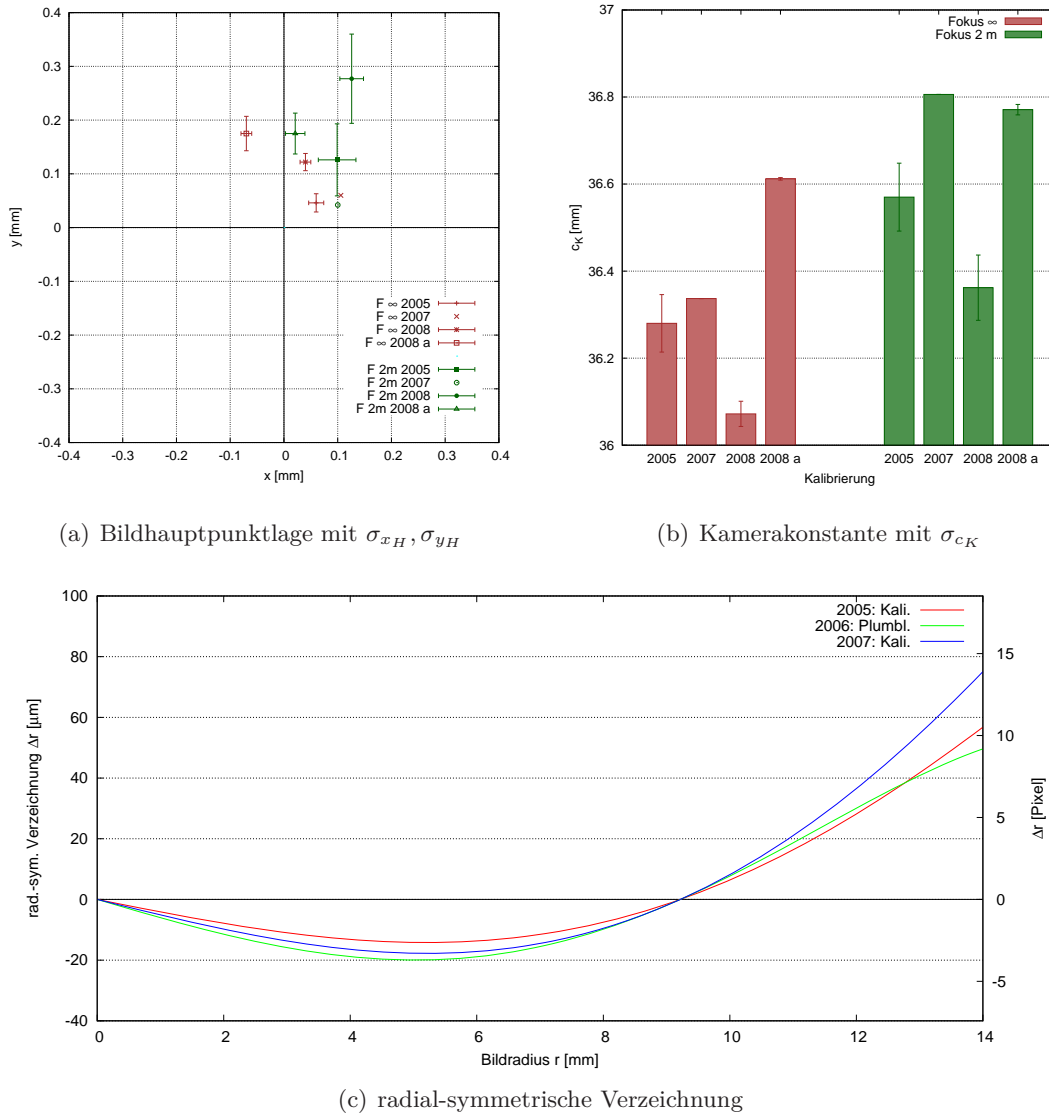


Abbildung 5.5: Vergleich der Kameraparameter aus verschiedenen Kalibrierungen

und damit auch nur eingeschränkt vergleichbar. Folgende Aussagen lassen sich jedoch aus den Untersuchungen ableiten:

- Die Bestimmung der inneren Orientierung wird unsicher bei vereinfachter Aufnahme-konfiguration, insbesondere ohne konvergente Aufnahmerichtungen, sowie bei manueller Messung der Pass- und Verknüpfungspunkte. Für eine sichere Bestimmung sollten daher vor Ort immer zusätzlich konvergente sowie möglichst auch um 100 gon gekantete Aufnahmen erstellt werden. Die Messung homologer Bildpunkte sollte automatisiert über Bildzuordnung (Kap. 4.3) erfolgen.
- Die Kamerakonstante sowie die Lage des Bildhauptpunktes unterliegen größeren Schwankungen, die nicht allein auf die Konfiguration bei der Kalibrierung zurückzuführen sind. Die Ergebnisse einer Testfeldkalibrierung können daher nicht für weitere Messungen übernommen werden, sondern sind durch eine Vor-Ort-Kalibrierung zu überprüfen

und ggf. zu aktualisieren.

- Die Parameter der radial-symmetrischen Verzeichnung können für Festbrennweitenobjektive als stabil angesehen und lassen sich damit im Vorfeld z.B. über eine Plumbline-Kalibrierung bestimmen. Lediglich für Präzisionsmessungen und Aufnahmeabstände kleiner als das 30fache der Brennweite (FRYER, 1996) müssen entfernungsabhängige Verzeichnungskorrekturen berücksichtigt werden (BROWN, 1971; FRYER, 1986).

Nicht-metrische Digitalkameras können für die Objekterfassung im Nahbereich verwendet werden. Die Parameter der inneren Orientierung sind jedoch *vor* jeder Messkampagne bzw. über Simultankalibrierung im Zuge der Bildorientierung erneut zu bestimmen. Hierfür können vereinfachte Verfahren der Vor-Ort-Kalibrierung unter Einhaltung bestimmter Aufnahmekonfigurationen zum Einsatz kommen. Die Messung homologer Bildpunkte sollte automatisiert über geeignete Zuordnungsverfahren erfolgen. Eine entsprechend hohe Anzahl geeigneter Punkte kann durch Anwendung eines Interest-Operators automatisch extrahiert werden.

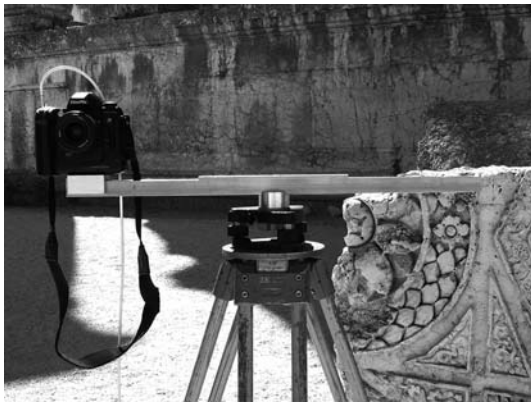
5.2 Aufnahmekonfiguration

5.2.1 Genäherter Stereonormalfall

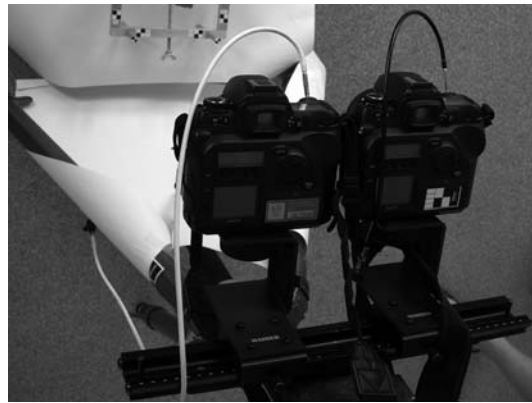
Die Grundlage für eine stereoskopische Betrachtung und Auswertung bilden zwei photogrammetrische Aufnahmen mit genähert paralleler Aufnahmerichtung die unter einem bestimmten Basisabstand der beiden Kamerastandpunkte erstellt wurden. Der Objektraum wird dabei in einem Überlappungsbereich in beiden Aufnahmen abgebildet. Sind für beide Aufnahmen die Parameter der inneren und äußeren Orientierung bekannt, so können durch stereoskopische Messung homologer Punkte in beiden Bildern maßstäbliche Informationen im Objektraum bestimmt werden.

Für die Anwendung in der terrestrischen Photogrammetrie wurden bereits zu Beginn des 20. Jh. erste Stereomesskammern entwickelt, bei denen der Normalfall der Stereophotogrammetrie durch zwei kalibrierte Messkammern realisiert wird, die unter einem definiertem Abstand auf einer Basisschiene fest montiert sind (SZANGOLIES, 1986). Diese Aufnahmekonfiguration ermöglicht eine dreidimensionale Auswertung eines Stereobildpaares ohne zusätzliche Objektinformationen, da die relative Orientierung beider Aufnahmen durch die Konstruktion festgelegt und konstant ist. Die Normalfallaufnahmen eignen sich unmittelbar für eine stereoskopische Betrachtung und Auswertung an einem analogen bzw. analytischen Auswertegerät.

Mit dem Übergang von der analogen/analytischen zur rein digitalen Photogrammetrie verlieren analoge Stereomesskammern jedoch zunehmend an Bedeutung, zumal die benötigten Filmträger (Planfilme oder Glasplatten) sehr teuer sind und kaum noch produziert werden. Der Wandel von der gerätetechnischen Realisierung des Stereonormalfalls in Form von Stereomesskammern hin zur analytisch-rechnerischen Rekonstruktion der Aufnahmesituation macht den Einsatz schwerer und unhandlicher Stereomesskammern zunehmend überflüssig. Lediglich für sehr große Bildmaßstäbe (1:5, 1:10) und für die Erzeugung qualitativ sehr hochwertiger Papiervergrößerungen werden auch heute noch vereinzelt die großformatigen Stereomesskammern verwendet. Mit dem stetig wachsenden Auflösungsvermögen digitaler Kameras werden jedoch auch diese letzten Einsatzgebiete in absehbarer Zeit wegfallen.



(a) Digitale Spiegelreflexkamera auf einer kalibrierten Basissschiene



(b) Synchrone Bilderfassung mit zwei baugleichen Kameras

Abbildung 5.6: Unterschiedliche Realisierungen eines Stereomesssystems mit digitalen Amateurkameras

In Anlehnung an das Prinzip der Stereomesskammern lässt sich unter Verwendung einer kalibrierten Basissschiene eine dem genäherten Stereonormalfall entsprechende Aufnahmekonfiguration realisieren (Abb. 5.6). Für die Aufnahmen werden hochauflösende Digitalkameras verwendet, deren innere Orientierung im Vorfeld bestimmt wurde (entsprechende Systeme wurden u.a. vorgestellt in HENZE u. a., 2006; BOOCHS u. a., 2007). Damit erhält man digitale Stereobildpaare, die zunächst wieder eine stereoskopische Betrachtung und Auswertung erlauben. Durch die sehr ähnliche Abbildungsgeometrie beider Aufnahmen eignen sich diese Bildpaare darüber hinaus aber auch für eine automatisierte Orientierung und Auswertung unter Nutzung flächenbasierter Korrelationsverfahren (Kap. 4.3).

Im Gegensatz zu klassischen Stereomesskammern, bei denen der Basisabstand konstruktiv festgelegt und damit nicht veränderbar ist, muss in einem flexiblen Messsystem der Abstand beider Aufnahmen an die jeweilige Objektgröße angepasst werden können. Mit dem in Abbildung 5.6(a) gezeigten Prototyp einer Basissschiene lassen sich definierte Basisabstände von 15 cm, 30 cm und 60 cm realisieren. Unter Verwendung der in Kapitel 5.1.4 untersuchten Kamera ergeben sich damit die in Abbildung 5.7 dargestellten Objektgenauigkeiten in Abhängigkeit des Aufnahmeabstandes. Aus den Untersuchungen in Kapitel 4.3.5 wird die Messgenauigkeit der Parallaxenmessung für homologe Punkte mit $1/10$ Pixel angenommen.

Bei einer Änderung des Basisabstandes bzw. beim Umsetzen der Kamera vom linken auf den rechten Standpunkt, bei Verwendung nur einer Kamera, muss jedoch die relative Orientierung der Aufnahmen jedesmal neu bestimmt werden. Soll eine größere Anzahl Stereomodelle mit jeweils gleichem Basisabstand erfasst werden, bietet sich daher die gleichzeitige Verwendung von zwei, möglichst baugleichen Kameras an, deren relative Orientierung nur zu Beginn einer Aufnahmeserie einmal zu bestimmen ist (Abb. 5.6(b)). Für alle weiteren Aufnahmen können die Orientierungsparameter dann übernommen werden. Neben dem Zeitgewinn bei der Aufnahme und Auswertung, kann durch eine synchrone Auslösung beider Kameras eine Lageänderung der Basissschiene zwischen linker und rechter Aufnahme vermieden werden.

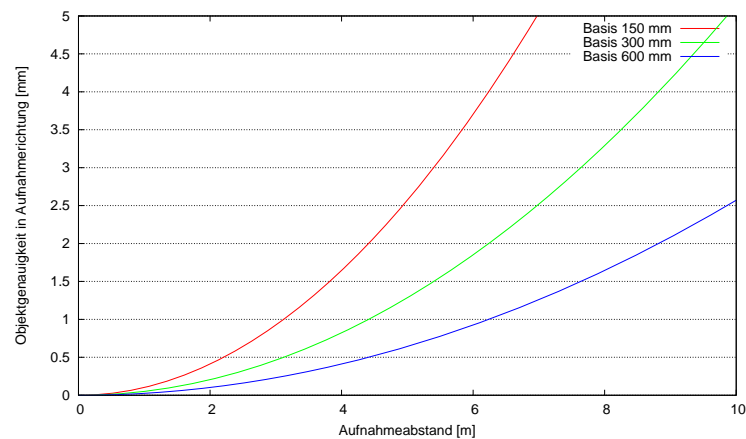


Abbildung 5.7: Objektgenauigkeit bei der Stereoauswertung in Abhängigkeit von Basis- und Aufnahmeabstand entsprechend Gleichung 2.3

5.2.2 Erweiterte Vier-Kamera-Konfiguration

Mehrdeutigkeiten entlang der Epipolarlinie (siehe Kap. 3.2.3) bei der automatisierten Messung in einem Stereobildpaar können zu falschen Punktzuordnungen und damit zu groben Fehlern in den berechneten Objektkoordinaten führen (MAAS, 1992, 1997). Durch eine Erweiterung der klassischen Stereokonfiguration um eine dritte bzw. vierte Kamera kann die Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten um den Faktor 100 im Vergleich zum Zweikameramodell reduziert werden (MAAS, 1992). Der Suchbereich für die Punktzuordnung wird dabei von der Epipolarlinie bzw. einem Epipolarband auf einen kleinen Bereich um den Schnittpunkt von Epipolarlinien herum reduziert.

Die in Kapitel 5.2.1 beschriebene Aufnahmekonfiguration kann durch eine vertikale Verschiebung der Basis recht einfach zu einer Vier-Kamera-Konfiguration erweitert werden (Abb. 5.8, HENZE u. a., 2008). Basis A und B sollten dabei näherungsweise parallel ausgerichtet sein, um eine automatische Punktzuordnung über alle vier Bilder sicherzustellen. Bei der Orientierung der vier Aufnahmen gehen die kalibrierten Basisabstände beider Stereomodelle als bekannte Größen in die Berechnung ein, was eine zusätzliche Kontrolle der relativen Orientierung erlaubt (siehe Kap. 5.3). Darüber hinaus kann das zweite Bildpaar ergänzende Objektinformationen für Bereiche liefern, die im ersten Stereomodell aufgrund von Verdeckungen nicht gemessen werden konnten.

5.3 Orientierungsverfahren

5.3.1 Einzelbildorientierung

Bei der Einzelbildorientierung mit Hilfe des räumlichen Rückwärtsschnittes (Kap. 3.2.5) müssen für jedes Bild einzeln durch manuelle oder automatische Messung die Bildkoordinaten den räumlichen Objektkoordinaten zugeordnet werden. Als Ergebnis erhält man sofort die Orientierung des Bildes im Objektkoordinatensystem. Zusätzlich können beim räumlichen Rückwärtsschnitt auch Parameter der inneren Orientierung mitbestimmt werden. Für die

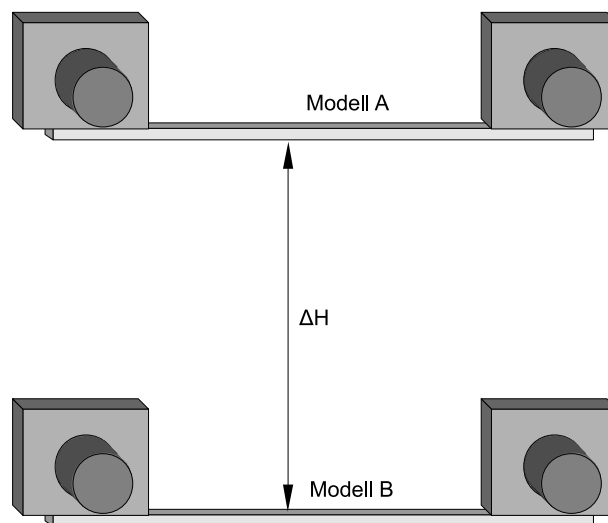


Abbildung 5.8: Vier-Kamera-Konfiguration durch Verschiebung der Basis A um ΔH

Bildorientierung durch räumlichen Rückwärtsschnitt müssen am Objekt genügend räumlich verteilte 3D Passpunkte vorhanden sein. Eine automatische Messung dieser Punkte lässt sich nur über kodierte Passmarken realisieren. Bei der Erfassung kleinerer Objekte (z.B. archäologische Kleinfunde oder Bauteilfragmente) können hierfür Kalibrierkörper genutzt werden, bei denen räumlich angeordnete Maßstäbe oder die 3D-Koordinaten markierter Passpunkte auf dem Körper als Objektreferenz dienen (Kap. 5.1.2). An größeren Objekten, wie Mauerresten, Fassaden oder ganzen Gebäuden, werden Passpunkte in der Regel durch tachymetrische Messungen bestimmt. Die Punkte müssen dabei so markiert sein, dass sie sich in den Bildern eindeutig anmessen lassen.

Für die automatisierte Stereoauswertung hat die Einzelbildorientierung nur eine geringe Bedeutung. Lediglich in größeren Bildverbänden, mit mehreren zusammenhängenden Stereomodellen wird die Einzelbildorientierung zur Beschaffung von Näherungswerten für die Mehrbildorientierung genutzt.

5.3.2 Relative und absolute Orientierung

Eine (zunächst) passpunktfreie Bildorientierung wird durch den Einsatz von Zwei- oder Mehrbildtechniken zur photogrammetrischen Erfassung möglich. Im einfachsten Falle beschränkt sich der Aufwand dabei auf die Aufnahme eines Bildpaares für eine stereoskopische Auswertung, wobei die Orientierungsparameter durch eine relative Bildorientierung mit bekannter Basis recht einfach und ohne zusätzliche Passinformationen am Objekt bestimmt werden können. Gerätetechnisch wurde dieses Aufnahmeverfahren bereits in der ersten Hälfte des 20. Jh. über Stereomesskammern realisiert (siehe z.B. SZANGOLIES, 1986), wobei hier die relativen Orientierungsparameter durch eine Kalibrierung im Vorfeld bekannt sind und z.T. auch nicht verändert werden können. Bei einer Stereoauswertung erhält man damit sofort maßstabsrichtige Objektkoordinaten, es werden keine weiteren Informationen aus dem Objektraum benötigt.

Die relative Orientierung eines Stereobildpaares bei bekannter innerer Orientierung der beteiligten Kamera(s) basiert auf der Zuordnung identischer Punkte in den beiden Bildern.

Im Überlappungsbereich eines Bildpaares müssen hierfür mindestens fünf homologe Punkte gemessen werden. Diese Verknüpfungspunkte können beliebige, gut zu identifizierende natürliche Punkte sein, für die keine Objektkoordinaten benötigt werden. Aus diesen Punktidentitäten können dann die räumliche Translation und die Rotation der beiden Bilder zueinander berechnet werden. Wurden mehr als fünf Punktpaare gemessen, erfolgt die Berechnung der relativen Orientierung durch eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen, was wiederum Aussagen über die erreichte Genauigkeit erlaubt (Kap. 3.2.3).

Die Parameter der relativen Orientierung beziehen sich zunächst auf ein Modellsystem, dessen Ausrichtung sich für den sogenannten Folgebildanschluss am Bildkoordinatensystem der linken Aufnahme bzw. für die Orientierung mit unabhängigen Bildpaaren an der Basisrichtung orientiert. Maßstab und Orientierung des Modellsystems im Objektraum werden anschließend über eine absolute Orientierung bestimmt. Im einfachsten Fall beschränkt sich die absolute Orientierung auf eine Skalierung des Modellsystems über eine bekannte Strecke im Objektraum.

Unter Verwendung einer kalibrierten Basisschiene mit bekanntem Abstand der beiden Kamerastandpunkte können sehr schnell und ohne Messung zusätzlicher Passinformationen am Objekt maßstabsgerechte Stereomodelle erstellt werden. Diese Herangehensweise bietet sich für die Erfassung kleinerer Einzelobjekte, wie Bauteile oder archäologische Funde, an, da hier oft nur eine Hauptansicht ausgewertet werden soll, eine übergreifende Verknüpfung mehrerer Stereomodelle also nicht notwendig ist.

5.3.3 Interaktive Messung von Verknüpfungspunkten

Im Gegensatz zur Zuordnung geodätisch bestimmter Passmarken im Bild über definierte Muster wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben, kommen für die Messung homologer Punkte in einem Stereobildpaar flächenhafte Korrelationsverfahren zum Einsatz. Dabei dient die in einem Bild gemessene Umgebung eines Punktes als Vorlage für die Suche des zugehörigen Bildpunktes im Stereopartner. Ähnlich wie bei der Einzelbildorientierung, muss zunächst die für die Berechnung der relativen Orientierung notwendige Mindestanzahl von Verknüpfungen interaktiv bestimmt werden. Im Referenzbild wird hierzu unter Beachtung der Punktverteilung (siehe u.a. REGENSBURGER, 1990; KRAUS, 1997) ein markanter Objektpunkt angemessen. Der zugehörige Suchbereich im Bildpartner muss manuell vorgegeben werden, da noch keine Informationen über die relative Lage der Bilder zueinander vorliegen. Die subpixelgenaue Zuordnung der Punktvorlage im Suchbild erfolgt automatisch mit Hilfe von Korrelationsverfahren oder einer Kleinste-Quadrate-Zuordnung (Kap. 4.3).

Nach der interaktiven Bestimmung von fünf Bildpunktpaaren können die Parameter der relativen Orientierung berechnet werden. Die Messung weiterer Punktverknüpfungen lässt sich dann auf die interaktive Vorgabe eines Punktes in *einem* der Bilder reduzieren. Der zugehörige Suchbereich im anderen Bild beschränkt sich auf ein schmales Band entlang der Epipolarlinie (HENZE u. a., 2006). Über Vorgaben zur minimalen bzw. maximalen Objektiefe kann der Suchbereich auf dem Epipolarband weiter eingegrenzt werden.

Die interaktive Bestimmung homologer Punkte unter Verwendung subpixelgenauer Zuordnungsverfahren erlaubt eine schnelle und flexible relative Orientierung von Bildpaaren. Durch die manuelle Anordnung und Verteilung der Verknüpfungspunkte im Modellbereich, kann

dabei die Stabilität und damit die Genauigkeit der Berechnung vom Anwender individuell beeinflusst werden.

5.3.4 Automatische relative Orientierung

Die Zuordnung homologer Punkte für die relative Orientierung lässt sich aber auch vollständig automatisieren, so dass keine manuelle Punktfestlegung mehr erforderlich ist. Für die Festlegung der Verknüpfungspunkte in den Bildern werden zwei unterschiedliche Ansätze vorgestellt. Neben einer vom Bildinhalt unabhängigen Punktfestlegung über ein Raster können Kandidaten für die Punktzuordnung auch mit Hilfe der in Kapitel 4.2 vorgestellten Interest-Operatoren extrahiert werden. Falsch zugeordnete Punkte lassen sich in beiden Fällen mit Hilfe einer robusten Ausreißerkennung eliminieren. Beide Ansätze zur Punktzuordnung sollen schließlich anhand praktischer Beispiele verglichen werden.

5.3.4.1 Punktfestlegung über ein festes Raster

Zunächst werden in einer niedrigen Auflösungsstufe der Bildpyramide Punkte über ein regelmäßiges Raster in einem der beiden Bilder festgelegt. Die zugehörigen Punkte im Bildpartner können aufgrund der geringen Auflösung sehr schnell mit Hilfe von Bildzuordnungsverfahren gefunden werden. Diese Punktpaare werden nun in die nächst höhere Auflösungsstufe übertragen und dort erneut über Korrelationsverfahren überprüft und korrigiert. Die Suche kann dabei auf einen sehr kleinen Bereich um die aus der vorigen Auflösungsstufe bestimmten Punktposition beschränkt werden. Zusätzlich wird das Startraster mit dem Übergang in die nächst höhere Auflösungsstufe verdichtet, wobei sich der Suchbereich für die zugehörigen Punkte im anderen Bild aus den benachbarten Rasterpunkten ergibt. Dieser Prozess der Punktverfolgung wird bis in die höchste Auflösungsstufe fortgesetzt, erst hier ergibt sich die endgültige Position und Anzahl der zugeordneten Punktpaare. Der Zuordnungsprozess kann zusätzlich durch eine näherungsweise Berechnung der relativen Orientierung gestützt werden.

Das Verfahren arbeitet sehr schnell, da keine aufwendigen Faltungsoperatoren auf die hoch aufgelösten Bilder angewendet werden müssen. Die Suche nach Kandidaten für die Bildzuordnung wird in einer niedrigen Auflösungsstufe durchgeführt und benötigt daher nur wenig Rechenzeit, die Berechnung der benötigten Bildpyramide kann bereits beim Laden der Bilder erfolgen.

Da die regelmäßige Anordnung der Punkte in einem Raster unabhängig vom eigentlichen Bildinhalt erfolgt, werden ggf. auch Bildpunkte verwendet, die für eine flächenbasierte Zuordnung ungeeignet sind (ZHANG und GRÜN, 2006). So können Bereiche mit wenig oder ungeeigneter (z.B. regelmäßiger) Objekttextur zu Fehlzugeordnungen oder dem Ausfall von Punktzuordnungen führen. Die für eine Punktzuordnung besonders geeigneten markanten Bildpunkte bleiben in der Regel unberücksichtigt.

5.3.4.2 Merkmalsextraktion mittels Interest-Operatoren

Mit Hilfe des in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Förstner-Operators werden zunächst unabhängig voneinander in beiden Bildern markante Punkte extrahiert. Um eine möglichst gleichmäßige

Verteilung der Punkte über das gesamte Bild zu erreichen, wird der Operator auf kleinere Bildsegmente angewandt und es wird der jeweils stärkste Punkt eines Segmentes als Kandidat für die Punktzuordnung weiterverwendet. Die Faltung des Bildes mit einem Glättungsfilter und die anschließende Berechnung der Autokorrelations-Funktion sind jedoch sehr rechenintensive Verfahren. Die Merkmalsextraktion findet daher nicht im Originalbild, sondern in einer niedrigeren Auflösungsstufe der Bildpyramide statt. Wird die Merkmalssuche in der ersten Stufe der Auflösungspyramide durchgeführt, ergibt sich bereits eine Geschwindigkeitssteigerung gegenüber einer Anwendung des Operators auf die Originalbilder um den Faktor vier.

Im Anschluss an die Merkmalsextraktion werden die beiden Punktfelder für linkes und rechtes Bild einer Korrespondenzanalyse unterzogen. Als Ähnlichkeitsmaß wird dabei der normierte Kreuzkorrelationskoeffizient (Kap. 4.3.2) verwendet. Zur Reduktion der Rechenzeit und zur Vermeidung von Fehlzuordnungen wird zusätzlich die relative Lage von Punkten zueinander berücksichtigt. So haben im genäherten Stereonormalfall alle x-Parallaxen das gleiche Vorzeichen und die Größe der y-Parallaxe sollte einen vorgegebenen Wert nicht überschreiten.

Eine subpixelgenaue Zuordnung der homologen Punkte erfolgt anschließend über eine Paraboloid- bzw. eine Kleinste-Quadrate-Anpassung (Kapitel 4.3.3 bzw. Kapitel 4.3.4). Im Ergebnis erhält man eine Liste homologer Punkte, über die dann die relative Orientierung berechnet werden kann.

5.3.4.3 Eliminierung von Ausreißern mittels RANSAC

Durch fehlende Objekttextur oder sich wiederholende Objektmerkmale kann es bei der automatischen Korrespondenzanalyse zu einer größeren Zahl falscher Punktzuordnungen kommen, die nur schwer über die statistischen Ergebnisse der Ausgleichungsrechnung aufzufinden sind. Es kommt zu einem „Verschmieren“ der Fehler und damit des Gesamtergebnisses, was soweit führen kann, dass eigentlich richtig zugeordnete Punkte als Ausreißer gekennzeichnet werden.

Ein robustes Verfahren zur Berechnung der relativen Orientierung, unter Beibehaltung der ursprünglichen Ausgleichungsalgorithmik (Minimierung der Summe der Abweichungsquadrate), stellt die Parameterschätzung mittels RANSAC dar (Random Sample Consensus; FISCHLER und BOLLES, 1981). Dabei wird die Berechnung der relativen Orientierung in Abhängigkeit des zu erwartenden relativen Anteils w an Ausreißern mehrfach (k -mal) mit der minimal notwendigen Anzahl n zufällig ausgewählter Punktzuordnungen ($n = 5$ Punktpaare) durchgeführt. Dies geschieht unter der Annahme, dass die Menge k der zufällig ausgewählten Minimalkonfigurationen mit einer Wahrscheinlichkeit z mindestens einen fehlerfreien Beobachtungssatz enthält. Die Anzahl k notwendiger Minimalkonfigurationen berechnet sich nach (FISCHLER und BOLLES, 1981) zu:

$$k = \frac{\log(1 - z)}{\log(1 - (1 - w)^n)} \quad (5.5)$$

Für das erste Beispiel „Geison-Block“ im folgenden Abschnitt beträgt der Anteil an Ausreißern ca. 10% ($w = 0,1$) bei einer minimal notwendigen Anzahl von $n = 5$ richtigen Punktzuordnungen. Soll die Menge der zu untersuchenden Lösungen mit 99%iger Wahrscheinlichkeit

($z = 0,99$) einen fehlerfreien Beobachtungssatz enthalten, so sind mindestens 6 (5,2) zufällig ausgewählte Minimalkonfigurationen zu untersuchen.

Für jede der k Lösungen wird anschließend aus der Gesamtmenge der Punktzuordnungen iterativ die Teilmenge von Punkten (Consensus Set - Menge konsistenter Punktpaare) bestimmt, für die die y-Parallaxe der Bildkoordinaten unter einem bestimmten Grenzwert liegt. Punktpaare, die zu einem Überschreiten des Grenzwertes führen, werden als Ausreißer eliminiert, während alle anderen Punktpaare dem jeweiligen Beobachtungssatz hinzugefügt werden. Der Beobachtungssatz mit den meisten konsistenten Punktpaaren wird schließlich für die endgültige Berechnung der relativen Orientierung entsprechend Kapitel 3.2.3 übernommen.

5.3.4.4 Vergleich der Verfahren

Die vorgestellten Verfahren zur automatisierten Orientierung eines Stereobildpaares wurden anhand zahlreicher Projektbeispiele auf ihre Anwendung für unterschiedliche Objekte hin untersucht. Zusätzlich zu den eigenen Implementierungen (Interest-Operator, Kreuzkorrelation und RANSAC) kam für die Punktfestlegung über ein festes Raster das Programm **metigo3D** der fokus GmbH Leipzig zum Einsatz. Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Untersuchungen anhand von 7 Beispielen exemplarisch vorgestellt werden. Alle Bildpaare wurden über eine kalibrierte Basisschiene im genäherten Stereonormalfall mit der in Kapitel 5.1.4 beschriebenen Kamera erstellt.

Die Punktfestlegung und -zuordnung über ein Raster wurde mit den in der Software **metigo 3D** vorgegebenen Standardeinstellungen durchgeführt. Die Suche nach homologen Punkten startet in der fünften Pyramidenstufe mit einem Ausgangsraster von 32×32 regelmäßig angeordneten Bildpunkten. Die Punktzuordnung erfolgt über eine Kleinste-Quadrate-Anpassung (Kap. 4.3.4).

Die Merkmalsextraktion mit dem Förstner-Operator wird in der ersten Auflösungsstufe durchgeführt (Stufe 0 entspricht dem Originalbild), eine gleichmäßige Punktverteilung über das gesamte Bild wird durch adaptive Anwendung der Schwellwerte auf Bildsegmente der Größe 100×100 Pixel erreicht (Kap. 4.2.1). Als Ähnlichkeitsmaß für die Punktzuordnung wird der normierte Kreuz-Korrelations-Koeffizient verwendet (Kap. 4.3.2), die subpixel-genaue Zuordnung erfolgt anschließend über Kleinste-Quadrate-Anpassung.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Beispiel	Raster PZ (falsch)	Interest-Operator		
		IP links/rechts	PZ-nKK (falsch)	RANSAC (falsch)
Geison-Block	69 (0)	271 / 275	75 (6)	69 (0)
Architrav	0	345 / 332	30 (2)	28 (0)
Platerias	47 (0)	322 / 343	53 (0)	-
rom. Kapitell	79 (0)	169 / 168	6 (0)	-
kor. Kapitell	50 (0)	178 / 181	47 (0)	-
Säule	66 (0)	256 / 265	29 (0)	-
Mauer	96 (0)	134 / 151	25 (0)	-

Tabelle 5.2: Vergleich der Punktzuordnungsverfahren für die relative Orientierung (PZ - Punktzuordnungen, IP - Interest-Punkte, nKK - norm. Kreuzkorr.)

Mit beiden Verfahren lassen sich homologe Punkte für die relative Orientierung *eines* Bildpaares automatisch bestimmen, wobei in Kombination mit einer robusten Ausreißererkennung keine Fehlzuordnungen mehr auftreten. In Abhängigkeit der Objektbeschaffenheit kommt es jedoch zu Unterschieden hinsichtlich der Anzahl und Verteilung zugeordneter Punkte.

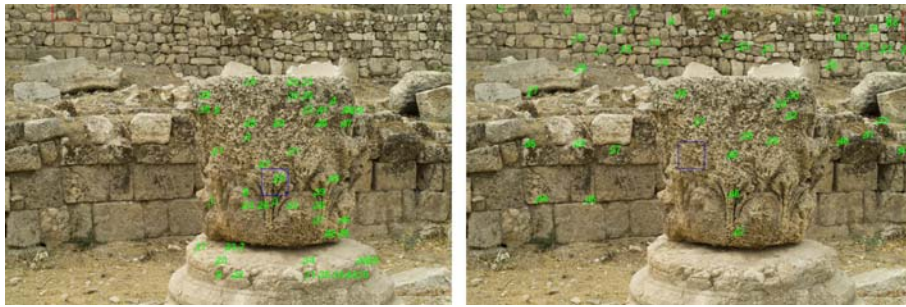
Aufgrund eines (zu) kleinen Suchbereiches in den untersten Auflösungsstufen werden bei der Punktfestlegung über ein Raster in der Regel nur Objektpunkte innerhalb eines bestimmten Tiefenbereichs im Objektraum gefunden (Beispiel „korinthisches Kapitell“, Abb. 5.9(a) links). Ist die x-Parallaxe der Aufnahmen zu groß, kann dies ggf. sogar dazu führen, dass keine Punktzuordnungen bestimmt werden können (Beispiel „Architrav“ in Tab. 5.2).

Die Merkmalsextraktion über einen Interest-Operator setzt markante Bildstellen voraus, die auch im Bildpartner in ähnlicher Weise abgebildet werden. In weitgehend homogenen Objektszenen können zugehörige Punktmerkmale nicht zuverlässig erkannt werden, so dass keine oder nur wenige homologe Punkte gefunden werden. Im Gegensatz dazu liefert eine von der Objekttextur unabhängige Punktfestlegung über ein Raster auch hier genügend Punktzuordnungen (Beispiel „romanisches Kapitell“, Abb. 5.9(b)). In (ZHANG und GRÜN, 2006) wird daher die Punktfestlegung über ein Raster als Ergänzung zur merkmalsbasierten Punktextraktion vorgeschlagen.

In allen Beispielen wird darüber hinaus deutlich, dass die Zahl extrahierter Interest-Punkte deutlich größer ist, als die Anzahl richtig zugeordneter Punkte. Dieses Verhältnis ist u.a. abhängig von den Parametern des Interest-Operators (Schwellwerte für Größe und Rundheit der Merkmale, Segmentgröße, siehe Kap. 4.2.1) sowie den Einstellungen für die Bildzuordnung (Schwellwerte für Kreuzkorrelationskoeffizient und Kleinste-Quadrate-Zuordnung). In (MAAS, 1996) wird für das dort verwendete Bildmaterial die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Punkt, der in einem Bild detektiert wurde auch in einem zweiten Bild gefunden wird, mit 65% angegeben. Aus den eigenen Untersuchungen ergibt sich mit den dabei verwendeten Parametereinstellungen lediglich eine Wahrscheinlichkeit von 15% für das Auffinden eines zugehörigen Punktes im Bildpartner. Während für die Orientierung *eines* Stereobildpaares damit eine ausreichenden Anzahl homologer Punkte bestimmt werden kann, müssen für die Orientierung mehrerer Bilder deutlich mehr Interest-Punkte extrahiert werden, da sich die Anzahl erfolgreicher Zuordnungen exponentiell mit der Anzahl der Bilder reduziert.

Die speziellen Eigenschaften beider Verfahren lassen sich in Abbildung 5.9(c) sehr anschaulich zeigen. Bei der Punktfestlegung über ein Raster (Abb. 5.9(c) links) werden zahlreiche Punkte auf der Säulentrommel zugeordnet, aufgrund der deutlich größeren x-Parallaxe für die Objekte im Hintergrund werden dort jedoch keine Punkte gefunden. Der Förstner-Operator (Abb. 5.9(c) rechts) hingegen liefert zwar für den gesamten Bildbereich homologe Punkte, die Textur der Säulentrommel reicht jedoch nicht aus, um auch hier eine ausreichende Anzahl von Interest-Punkten für die Zuordnung zu extrahieren.

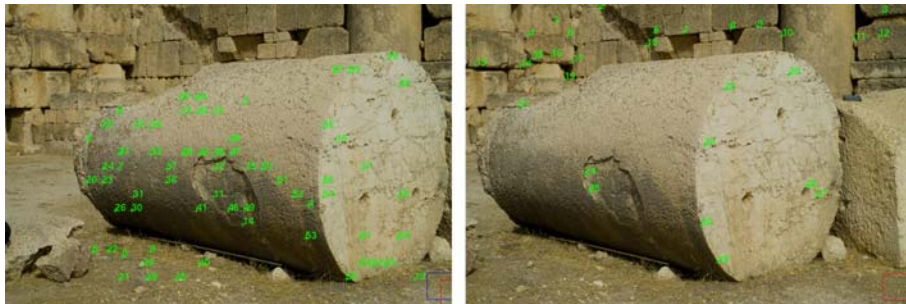
Für die automatische Bestimmung identischer Objektpunkte in *mehreren* Stereobildpaaren eignet sich die Punktfestlegung über ein festes Raster nicht. Da die Lage der gefundenen Punktpaare und der sich daraus ergebenden Modellkoordinaten vom vorgegebenen Raster abhängt und damit unabhängig vom eigentlichen Objekt ist, werden in jedem Bildpaar andere Modellpunkte für die Orientierung verwendet. Eine Verknüpfung mehrerer Stereomodelle ist nicht möglich. In der Regel werden daher für die modellübergreifende Orientierung merkmalsbasierte Verfahren der Punktzuordnung eingesetzt (siehe z.B. LÄBE und FÖRSTNER, 2005).



(a) Beispiel „korinthisches Kapitell“



(b) Beispiel „romanisches Kapitell“



(c) Beispiel „Säule“

Abbildung 5.9: Ergebnisse der Punktfestlegung über ein Raster (links) und über Interest-Operator (rechts)

5.3.5 Orientierung einer Vier-Kamera-Konfiguration

Die Orientierung einer Vier-Kamera-Konfiguration (Kap. 5.2.2) lässt sich aus der automatischen relativen Orientierung *eines* Bildpaares (Kap. 5.3.4) ableiten.

Zunächst werden in allen vier Bildern markante Punkte über einen Interest-Operator extrahiert, wobei sichergestellt sein muss, dass für die gemeinsame Orientierung beider Stereomodelle genügend identische Bildpunkte in allen vier Bildern gefunden werden. Da der SIFT-Operator (Kap. 4.2.4) in seiner ursprünglichen Form nur homologe Punkte für Bildpaare liefert, kommt für die Merkmalsextraktion eine angepasste Implementierung des Förstner-Operators zum Einsatz. In den Untersuchungen wurden damit ca. 20% der für die Berechnung verwendeten Punkte in allen vier Bildern bestimmt.

Anschließend erfolgt, ausgehend von einem festzulegendem Start-Bild, eine paarweise Suche nach homologen Punkten in allen Bildern. Als Ähnlichkeitsmaß wird dabei der normier-

te Kreuzkorrelationskoeffizient (4.3.2) mit anschließender Kleinste-Quadrate-Anpassung verwendet. In einer Vier-Kamera-Konfiguration ergeben sich insgesamt 6 Bildpaarkombinationen für die Suche nach homologen Punkten (siehe Abb. 5.10). Eine sequenzielle Suche in allen 6 Bildkombinationen führt jedoch in Abhängigkeit des Suchpfades und der Suchrichtung zu unterschiedlichen Lösungen bei der Punktbestimmung. Zudem ist die Lösung abhängig von der Festlegung des Startbildes, d.h. der Referenz für die Bildzuordnung. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine pragmatische Lösung gewählt, bei der für die Suche nach homologen Punkten ausgehend von einem Referenzbild nur *ein* Zuordnungspfad berücksichtigt wird, womit sich die Anzahl der zu untersuchenden Bildpaare auf 3 reduziert.

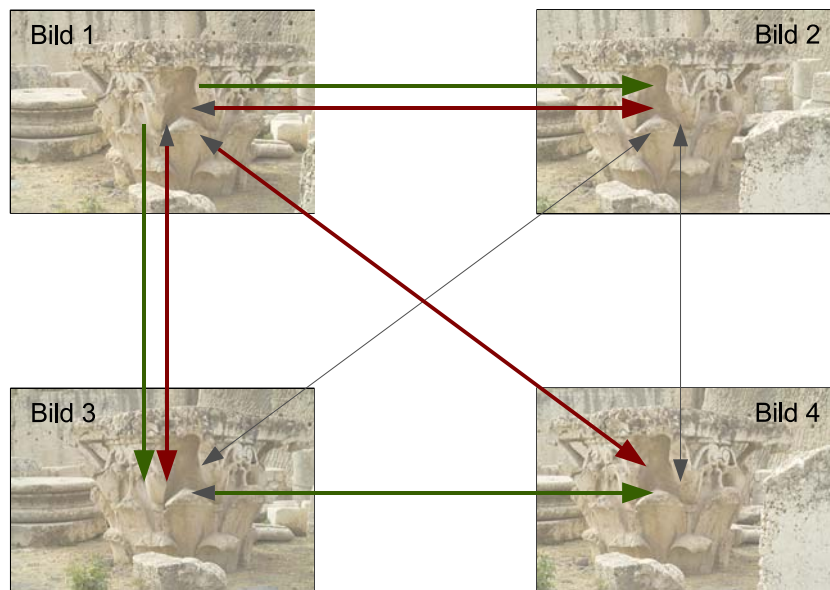


Abbildung 5.10: Mögliche Bildkombinationen für die Punktzuordnung in einer Vier-Kamera-Konfiguration, rot/grün: verwendete Zuordnungspfade für die Untersuchungen

Im Anschluss an die Punktzuordnung erfolgt zunächst eine getrennte relative Orientierung für Basis 1 und Basis 2, wobei Ausreißer bei der Punktzuordnung mit Hilfe des in Kapitel 5.3.4 vorgestellten RANSAC-Algorithmus eliminiert werden. Aufgrund der bekannten Basisabstände zwischen rechtem und linkem Bild liegen die Modellkoordinaten beider Systeme anschließend bereits im Objektmaßstab vor. Über identische Modellpunkte werden nun die Modellkoordinaten von System 2 in das Modellkoordinatensystem der ersten Basis transformiert, was einer absoluten Orientierung der zweiten Stereobasis auf das Koordinatensystem der ersten Stereobasis entspricht (siehe Kap. 3.2.3). Damit liegen für alle gemessenen Bildkoordinaten Näherungswerte für die Objektkoordinaten bezogen auf die erste Stereobasis vor.

Mit Hilfe dieser genäherten Objektkoordinaten kann schließlich eine Bündelausgleichung aller vier Aufnahmen erfolgen. Die Berechnung erfolgt als freie Netzausgleichung, wobei als Maßstabsreferenz die Basisabstände von Basis 1 und 2 einfließen.

5.3.5.1 Untersuchungsergebnisse

Im Folgenden sollen exemplarisch die Ergebnisse der automatisierten Vier-Kamera-Orientierung für zwei unterschiedliche Aufnahmesituationen aufgeführt werden. Für die automatische Zuordnung von Bildpunkten in allen vier Bildern wurden dabei jeweils zwei verschiedene Zuordnungspfade untersucht:

1. Ausgehend vom linken Bild der ersten Stereobasis (Bild 1) werden nacheinander homologe Punkte in Bild 2, Bild 3 und Bild 4 gesucht (1-2, 1-3, 1-4, rote Pfeile in Abb. 5.10).
2. Zunächst werden, ausgehend von Bild 1, homologe Punkte in Bild 2 und in Bild 3 gesucht. Anschließend werden, ausgehend von Bild 3, homologe Punkte in Bild 4 gesucht, wobei die aus Bild 1 „übertragenen“ Punkte als Referenz für die Zuordnung übernommen werden (1-2, 1-3, 3-4, grüne Pfeile in Abb. 5.10).

In Tabelle 5.3 sind die Ergebnisse der Orientierung für zwei Beispiele aufgeführt, wobei jeweils die beiden untersuchten Zuordnungsvarianten gegenüber gestellt werden. Als Aufnahmesystem kam die in Kapitel 5.1.4 beschriebene Kombination aus Fuji FinePix S2 Pro mit 35 mm Festbrennweitenobjektiv zum Einsatz. Das Kapitell hat eine Höhe von ca. 1,9 m, der Aufnahmeabstand betrug bei einer Fokussierung auf unendlich ca. 5 m. Das zweite Beispiel zeigt einen ca. 1,4 m x 1 m großen Bereich eines Geison-Blockes (siehe Beispiel (f) in Anhang B) bei einem Aufnahmeabstand von ca. 2 m.

Beim Vergleich der Orientierungsparameter wird deutlich, dass der Zuordnungspfad nur einen geringen Einfluss auf die Ergebnisse der Orientierung hat. Die verbleibenden Unterschiede zwischen den Parametern lassen sich auf die Genauigkeit bei der flächenbasierten Punktzuordnung zurückführen, die Abweichungen der Bildkoordinaten (RMS) entsprechen den in Kapitel 4.3.5 ermittelten Ergebnissen bei der Bildzuordnung für leicht konvergente bzw. gegeneinander gekantete Aufnahmen.

Die Abhängigkeit der Punktzuordnung vom Suchpfad zeigt sich beim Vergleich identischer Punktzuordnungen für beide Zuordnungswege im Bild 4. Für den ersten Fall werden homologe Punkte durch Bildzuordnung ausgehend von Bild 1 direkt bestimmt, während im zweiten Fall zunächst eine Zuordnung in Bild 3 erfolgt und ausgehend von den dort gefundenen Punkten werden dann homologe Punkte in Bild 4 gesucht. Aus den beiden Zuordnungspfaden ergeben sich für das erste Beispiel 22 und für das zweite Beispiel 40 identische Punkte in Bild 4. Die Differenzen der Bildkoordinaten aus beiden Bestimmungen betragen im (quadratischen) Mittel (RMS) für beide Koordinatenrichtungen ca. 0,4 Pixel.

Perspektive Unterschiede zwischen dem Referenzbild 1 der ersten Basis und den Bildern 3 und 4 der vertikal versetzten Basis führen zu einer geringeren Anzahl von Punktzuordnungen im Vergleich zu den in Bild 2 zugeordneten Punkten. In Zuordnungsvariante 1 (1-2, 1-3, 1-4) ist daher auch die Anzahl der für die Bündelblockausgleichung verwendeten Bildkoordinaten in den Bildern 3 und 4 niedriger als in den Bildern 1 und 2 der ersten Basis. In der zweiten Zuordnungsvariante werden getrennt für jede Basis homologe Punkte im jeweils zugehörigen Stereopartner (1-2, 3-4) gesucht und zusätzlich werden durch die Zuordnung der Bilder 1 und 3 Punktidentitäten zwischen erster und zweiter Basis bestimmt. Damit ist die Anzahl der verwendeten Punkte für alle Bilder in etwa gleich groß.



	Kapitell, Fokus ∞  Reihenfolge der Bildzuordnung: 1-2 1-3 1-4 1-2 1-3 3-4		Geison, Fokus 2 m  Reihenfolge der Bildzuordnung: 1-2 1-3 1-4 1-2 1-3 3-4	
	<i>Objekt-Koordinaten</i>		<i>Objekt-Koordinaten</i>	
Anzahl Punkte	106		117	
RMS X/Y/Z [mm]	1,4/6,7/1,1		0,3/3,0/0,2	
	<i>Bild 1</i>		<i>Bild 1</i>	
X0/Y0/Z0 [m]	0,000/0,000/0,000		0,000/0,000/0,000	
$\omega/\varphi/\kappa$ [gon]	99,987/0,118/-0,980		99,971/-0,081/0,176	
RMS x/y [Pixel]	0,081/0,130		0,123/0,156	
Anzahl POI	816		570	
Anzahl Punkte	102		113	
	<i>Bild 2</i>		<i>Bild 2</i>	
X0/Y0/Z0 [m]	0,600/0,000/0,000		0,300/0,000/0,000	
$\omega/\varphi/\kappa$ [gon]	100,001/0,082/0,015		100,004/0,371/-0,502	
RMS x/y [Pixel]	0,102/0,148		0,136/0,176	
Anzahl POI	856		525	
Anzahl Punkte	88		100	
	<i>Bild 3</i>		<i>Bild 3</i>	
X0/Y0/Z0 [m]	0,214/-0,175/0,478		-0,005/0,010/0,241	
$\omega/\varphi/\kappa$ [gon]	95,350/2,231/-0,281		95,553/0,154/0,289	
RMS x/y [Pixel]	0,195/0,144		0,178/0,172	
Anzahl POI	800		538	
Anzahl Punkte	54		69	
	<i>Bild 4</i>		<i>Bild 4</i>	
X0/Y0/Z0 [m]	0,817/-0,155/0,474		0,295/0,012/0,242	
$\omega/\varphi/\kappa$ [gon]	95,223/2,225/-0,890		95,582/0,543/-0,491	
RMS x/y [Pixel]	0,125/0,141		0,127/0,180	
Anzahl POI	857		549	
Anzahl Punkte	45		53	

Tabelle 5.3: Ergebnisse der automatischen Orientierung von Vier-Kamera-Konfigurationen für jeweils zwei unterschiedliche Zuordnungspfade

5.3.6 Automatisierte Mehrbildorientierung

Für die Erfassung größerer und komplexerer Objekte müssen oft mehrere überlappende Stereomodelle erstellt und in einem einheitlichen Objektsystem ausgewertet werden (Abb. 5.11). Die gemeinsame Orientierung aller beteiligten Aufnahmen kann über eine klassische Bündelausgleichung erfolgen (Kap. 3.2.6). Für eine Verknüpfung benachbarter Stereomodelle müssen die Bildkoordinaten homologer Punkte modellübergreifend in mehreren Bildern gemessen werden. Die Berechnung kann zunächst ohne zusätzliche Objektinformationen als freie Netzausgleichung erfolgen (relative Orientierung). Die Transformation in ein Objektsystem (absolute Orientierung) erfolgt anschließend über (wenige) Passinformationen am Objekt. So reicht bereits eine bekannte Objektstrecke aus, um das Modellkoordinatensystem der freien Netzausgleichung richtig zu skalieren.

In Anlehnung an das in (LÄBE und FÖRSTNER, 2005) bzw. (LÄBE und FÖRSTNER, 2006) vor-

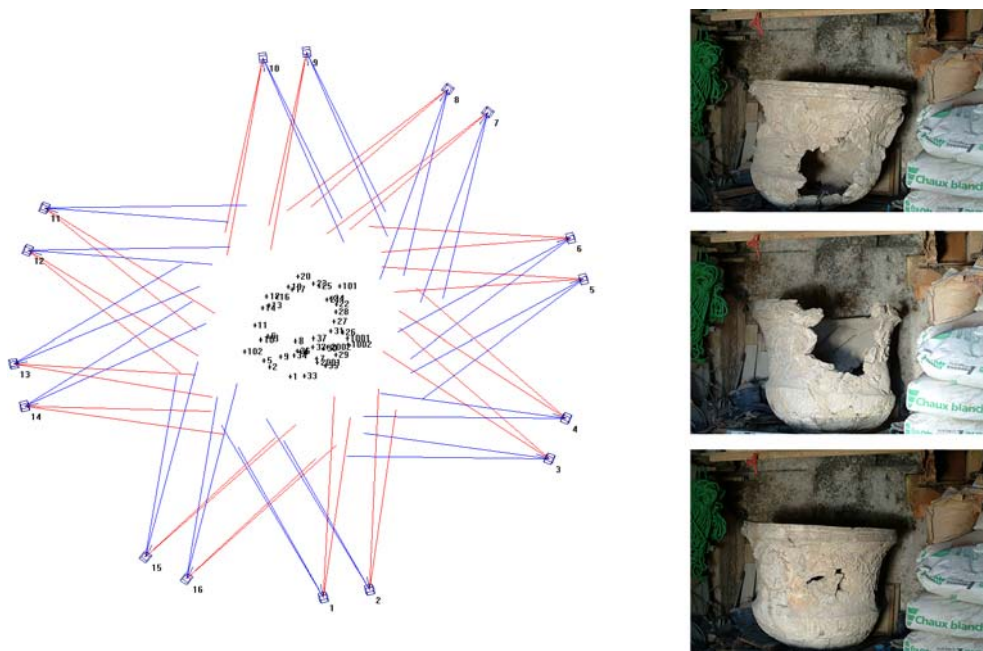


Abbildung 5.11: Aufnahmekonfiguration zur Erfassung eines Kraters mit insgesamt 16 Aufnahmen in 8 Stereomodellen

gestellte Verfahren lässt sich die Orientierung mehrerer überlappender Stereobildpaare weitgehend automatisieren. Zunächst werden in allen beteiligten Bildern markante Punkte über einen Interest-Operator extrahiert. Für die Zuordnung von Punktmerkmalen in konvergenten Bildern wird der in (LOWE, 2004) vorgestellte SIFT-Operator (Kap. 4.2.4) verwendet. Der Zuordnungsprozess kann durch Vorabinformationen über benachbarte Stereomodelle sowie über die zu einem Stereomodell gehörenden Bilder von $O(n^2)$ möglichen Bildzuordnungen auf $O(n)$ zu untersuchende Bildpaare reduziert werden. Mit diesem Vorwissen erfolgt anschließend eine paarweise relative Orientierung benachbarter Bilder, wobei zur Eliminierung von Ausreißern wiederum der in Kapitel 5.3.4 vorgestellte RANSAC-Algorithmus verwendet wird. Ausgehend von einem festzulegenden Stereomodell werden nun über gemeinsame Objekt- bzw. Modellpunkte benachbarter Bilder sukzessive alle Stereomodelle in das Koordinatensystem des Startmodells überführt und schließlich in einer Bündelblockausgleichung gemeinsam orientiert.

5.3.7 Referenzierung von Stereomodellen über Oberflächengeometrien

Die Orientierung eines Mehrbildverbandes setzt, selbst bei automatischer Messung der homologen Punkte, weitreichende photogrammetrische Kenntnisse zur Beurteilung und Optimierung der Berechnungen voraus. Mit steigender Bildanzahl wächst die Anzahl der automatisch gemessenen Punkte und damit die Komplexität des Ausgleichungssystems. Fehler bei der automatischen Bildzuordnung sind im Gegensatz zur manuellen und damit bewussten Messung homologer Punkte oft schwer auszumachen und verlangen nach einer detaillierten Analyse der statistischen Größen der Bündelausgleichung.

Verbleibende Orientierungsfehler innerhalb eines Verbandes aus mehreren Stereomodellen können dazu führen, dass sich bei einer gemeinsamen Bündelausgleichung aller Bilder die in-

nere Genauigkeit einzelner Stereomodelle im Vergleich zur getrennten relativen Orientierung dieser Modell verschlechtert. Damit kommt es zu Fehlern bei der Bestimmung von Objektkoordinaten in den betroffenen Stereomodellen, was letztlich zu Spannungen bei der Erstellung eines einheitlichen Objektmodells führt.

Als Alternative zur gemeinsamen Bündelausgleichung mehrerer Stereomodelle wird daher eine nachträgliche Referenzierung der Modelle über identische Oberflächengeometrien vorgeschlagen. Hierbei erfolgt zunächst eine getrennte relative Orientierung aller Stereomodelle, ohne dass über Verknüpfungspunkte ein Bezug zu benachbarten Modellen hergestellt wird. Die relative Orientierung kann dabei mit dem in Kapitel 5.3.4 beschriebenen Vorgehen vollständig automatisiert werden. Anschließend werden für jedes Stereomodell mit den in Kapitel 5.4 vorgestellten Verfahren automatisch Oberflächengeometrien in jedem Stereomodell bestimmt. Dabei werden zumeist sehr dichte 3D-Punktwolken generiert, die mit den Messdaten (aktiv) scannender Verfahren vergleichbar sind.

Für die Zusammenführung und gegenseitige Orientierung (Co-Registrierung) unregelmäßiger Punktwolken existieren verschiedene Verfahren, die in der Regel auf der Minimierung der Punktabstände zweier sich überlappender Punktwolken basieren. Eines der bekanntesten Verfahren ist der *Iterative Closest Point* - Algorithmus (ICP; BESL und MCKAY, 1992; ZHANG, 1994), bei dem die 6 Parameter einer nicht formverändernden Transformation (Rigid Body Transformation, 3 Translationen, 3 Rotationen) bzw. die 7 Parameter einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation (zusätzlich ein Maßstabsfaktor) bestimmt werden. Voraussetzungen für eine erfolgreiche Zuordnung von Punktwolken sind ein genügend großer Überlappungsbereich am Objekt sowie eine geeignete Oberflächengeometrie. Ein im Vergleich zur Größe der Gesamtpunktwolke zu kleiner/schmäler Überlappungsbereich führt zu Unsicherheiten bei der Bestimmung der Transformationsparameter während bei fehlenden Geometrieinformationen, z.B. an rotationssymmetrischen oder ebenen Objektoberflächen, eine eindeutige Zuordnung der Punktwolken scheitern kann. Zahlreiche Weiterentwicklungen und Optimierungen des ICP-Algorithmus wurden seither veröffentlicht, ein umfassender Überblick über die verschiedenen Verfahren sowie über aktuelle Entwicklungen findet sich u.a. in (GRÜN und AKCA, 2005) sowie in (AKCA, 2007).

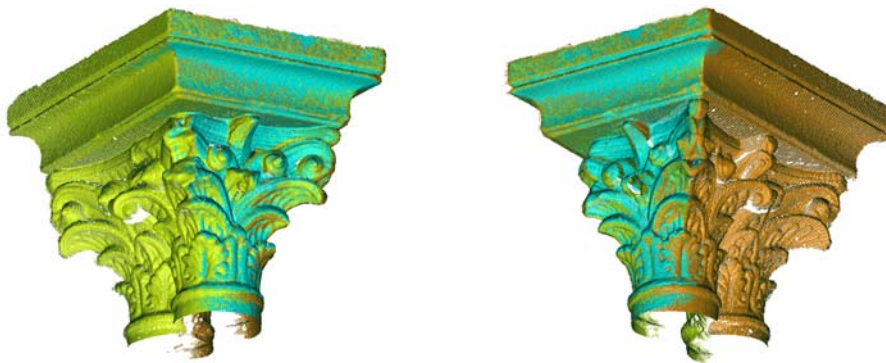
Abbildung 5.12 zeigt das Ergebnis der gegenseitigen Registrierung von drei Punktwolken, die durch automatische Oberflächenmessung in drei konvergenten Stereomodellen gewonnen wurden. Als Aufnahmesystem kam die in Kapitel 5.1.4 untersuchte Kamera Fuji FinePix S2 Pro mit 35 mm-Objektiv zum Einsatz, der Aufnahmeabstand betrug 2 m bei einem Basisabstand von 30 cm. Damit ergibt sich entsprechend Kapitel 2.3.2 ein mittlerer Punktfehler von maximal 0,4 mm. Bei einem mittleren Punktabstand innerhalb einer Punktwolke von ca. 1,2 mm wurden insgesamt mehr als 900.000 Punkte in den drei Modellen bestimmt.

Zur Berechnung von Näherungswerten für die Registrierung werden in jeweils zwei überlappenden Punktwolken mindestens drei identische Objektbereiche durch interaktive Messung bestimmt. Anhand dieser manuell gewählten Punkte erfolgt zunächst eine paarweise Grobausrichtung der Punktwolken zueinander. Im Anschluss werden alle drei Punktwolken in einem gemeinsamen Koordinatensystem global registriert, wobei die Punktabstände zwischen den beteiligten Punktwolken minimiert werden. Aus der Gesamtpunktmenge wurden 8.000 Punkte für die Berechnung der 6 Transformationsparameter verwendet.

Für das gezeigte Beispiel ergibt sich nach der Registrierung ein mittlerer Punktabstand von 0,8 mm zwischen den Punktwolken bei einer Standardabweichung von 1,1 mm. Allerdings



(a) Einzelne Punktwolken aus drei konvergenten Stereomodellen



(b) Über ICP referenzierte Punktwolken des Gesamtmodells

Abbildung 5.12: Registrierung von Punktwolken über identische Objektgeometrien

treten an Kanten und in Bereichen mit großen Abweichungen zwischen Oberflächennormale und Aufnahme­richtung z.T. deutlich größere Differenzen zwischen den überlappenden Punktwolken auf (bis zu 6 mm, siehe Abb. 5.13). Diese Abweichungen lassen sich auf die in Kapitel 4.3 genannten Einschränkung bei der flächenbasierten Bildzuordnung zurückführen.

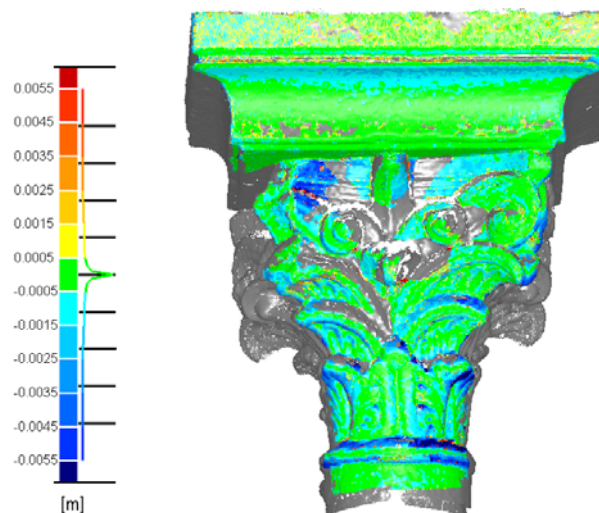


Abbildung 5.13: Abweichungen der Punktwolken bei der globalen Registrierung

5.4 Automatisierte Oberflächenmessung

Die Grundlage für eine automatisierte Messung dreidimensionaler Objektpunkte bilden die in Kapitel 4 vorgestellten Verfahren zur flächen- bzw. kantenbasierten Bildzuordnung. Dabei wird vorausgesetzt, dass für alle Bilder einer Zwei- oder Vierbild-Konfiguration die Daten der inneren und äußeren (relativen) Orientierung vorliegen. Bei der automatischen Oberflächenmessung kann zwischen einer punkt- bzw. flächenbasierten Auswertung und einer konturbasierten Auswertung unterschieden werden. Die Wahl des Auswerteverfahrens hängt dabei einerseits von der konkreten Aufgabenstellung ab, zum anderen bestimmen die Geometrie und Oberflächentextur des zu erfassenden Objektes maßgeblich die Vorgehensweise bei der Auswertung.

5.4.1 Punktbasierte Auswertung

Die punkt- bzw. flächenbasierte Auswertung stellt eine Erweiterung der in Kapitel 4.3 vorgestellten Verfahren zur Zuordnung *einzelner* Punkte dar. Ausgehend von einem oder mehreren Startpunkten werden durch eine Expansion der Punktzuordnung auf benachbarte Regionen automatisch weitere Punktkorrespondenzen bestimmt. Die Startpunkte können dabei entweder interaktiv vorgegeben werden oder, entsprechend der Punktfestlegung bei der relativen Orientierung (Kap. 5.3.4), automatisch bestimmt werden (REMONDINO und ZHANG, 2006). Es entsteht ein dichtes Netz homologer Bildpunkte aus dem sich schließlich eine die Objekt-oberfläche beschreibende dreidimensionale Punktwolke ergibt. Das Verfahren eignet sich vor allem für die Erfassung weitgehend stetiger Oberflächenbereiche. Voraussetzung ist dabei, dass auf der gesamten auszuwertenden Oberfläche eine für die Punktzuordnung geeignete Textur vorhanden ist (siehe Kap. 4.3).

Je nach Vorwissen über das zu erfassende Objekt kann bei der flächenhaften Bildauswertung zwischen einem rein bildbasierten Vorgehen und einer objektbezogenen Auswertung unterschieden werden:

- Bei der *bildbasierten Auswertung* werden Auswertebereich und Punktabstand ausschließlich über die Pixelmatrix eines der beiden Bilder definiert, ein Bezug zum Objekt bzw. zur Orientierung der Aufnahmen besteht zunächst nicht. Für jedes Pixel im Referenzbild wird der zugehörige Punkt im anderen Bild gesucht, wobei als Näherungswerte für die Punktsuche die Parallaxenwerte des vorangegangenen Punktes übernommen werden. Der Suchbereich kann zudem mit Hilfe der Epipolargeometrie (Kap. 3.2.3) eingegrenzt werden. Aus den zugeordneten Bildpunkten werden anschließend über die bekannten Orientierungsparameter 3D-Koordinaten berechnet. Erst an dieser Stelle wird der Bezug zum Objekt- bzw. Modellraum hergestellt. Die Grundlage für die Oberflächenmessung bildet damit das im Referenzbild definierte Raster für die Punktzuordnung.
- Im Gegensatz dazu werden bei einer *objektbezogenen Auswertung* der zu erfassende Bereich und der Punktabstand im Objektraum definiert, wodurch sich ein Punktraster bezüglich einer an das Objekt angepassten Bezugsfläche (z.B. Koordinatenebene oder Zylinder) ergibt. Mit dem Vorwissen über die Oberflächengeometrie erhält man für

jeden Rasterpunkt im Objektraum über die Kollinearitätsgleichungen (Kap. 3.2.2) Näherungswerte für die Punktzuordnung im Bildraum. Der Suchbereich für die subpixelgenaue Zuordnung ist abhängig von der Qualität und Genauigkeit der vorgegebenen Objektgeometrie. Liegt nur eine grobe Näherung vor, so muss der Suchbereich entsprechend vergrößert werden, wobei auch hier eine Eingrenzung über die Epipolargeometrie erfolgen kann. Schließlich werden aus den zugeordneten Bildkoordinaten die tatsächlichen Objektkoordinaten durch räumlichen Vorwärtsschnitt (Kap. 3.2.4) berechnet. Das Verfahren kommt insbesondere dann zum Einsatz, wenn 3D-Oberflächenpunkte an vorgegebenen Positionen im Objektraum bestimmt werden sollen. So können beispielsweise im Objektsystem vorgegebene Profillinien direkt gemessen werden, indem die Expansion der Punktzuordnung, ausgehend von einem Startpunkt, nur in einer Koordinatenrichtung bzw. entlang eines vorgegebenen Vektors erfolgt. Bei einer bildbasierten Auswertung hingegen müssen entsprechende Schnitte erst aus den umliegenden Objektpunkten interpoliert werden. Voraussetzung für die objektbezogene Auswertung ist jedoch, dass im Objektraum eine geeignete Bezugsfläche definiert werden kann.

Abbildung 5.14 zeigt einen Vergleich zwischen bild- und objektbasierter Auswertung. Ausgehend von automatisch bestimmten Startpunkten werden bei der bildbasierten Auswertung durch eine Expansion der Bildzuordnung auf eine Vierer-Nachbarschaft bereits zugeordneter Punkte weitere Punktpaare gesucht. Abbildung 5.14(a) zeigt einen Zwischenstand nach Zuordnung von ca. 15% der insgesamt zu untersuchenden Bildpunkte. Die Rasterweite für die Expansion wurde auf 5 Pixel im Referenzbild festgelegt, was einem Punktabstand von ca. 2 mm am Objekt entspricht.

Bei dem in Abbildung 5.14(b) gezeigten Beispiel einer objektbasierten Auswertung werden einzelne Profile automatisch bestimmt. Dabei wird ein Startpunkt am Objekt durch interaktive Messung vorgegeben. Über die Angabe der Profillänge und des Punktabstandes am Objekt erfolgt die Expansion der Bildzuordnung parallel zu den Koordinatenachsen des Modell- bzw. Objektkoordinatensystems. Im gezeigten Beispiel wurde ein Punktabstand von 1 mm gewählt.



(a) bildbasierte Auswertung: flächenhafte Bestimmung der Objektgeometrie



(b) objektbasierte Auswertung: Messung einzelner Profile

Abbildung 5.14: Automatische Oberflächenmessung durch punktbasierte Auswertung (Anaglyphendarstellung)

Als Ähnlichkeitsmaß für die Punktzuordnung wird in der Regel der normierte Kreuzkorrelationskoeffizient verwendet, die subpixelgenaue Zuordnung erfolgt über eine Paraboloid- oder Kleinste-Quadrate-Anpassung. Für die automatische Oberflächenmessung in stereoskopischen Bildpaaren hat sich dabei die nicht-iterative Paraboloid-Anpassung (Kap. 4.3.3) als schnelles und zuverlässiges Zuordnungsverfahren bewährt. Allerdings können hierbei keine Aussagen über die erreichte Genauigkeit der Punktzuordnung getroffen werden. Werden diese Informationen benötigt, muss die Punktzuordnung über eine Kleinste-Quadrate-Anpassung erfolgen, wobei durch die iterative Berechnung, je nach Aufnahmekonfiguration und Objektgeometrie, ein deutlich höherer Rechenaufwand entsteht.

Die flächenbasierte Bildkorrelation kann aufgrund unzureichender oder sich wiederholender Oberflächentexturen zu Fehlzusordnungen führen, wobei die Wahrscheinlichkeit hierfür proportional zur Größe des Suchbereichs ist (MAAS, 1997). Für die Eliminierung von Ausreißern bei der Punktzuordnung werden mehrere Kriterien herangezogen:

- Eine erste Selektion erfolgt über die Schwellwerte für den Korrelationskoeffizienten bzw. für die Kleinste-Quadrate-Anpassung. Ein zu niedriger Schwellwert führt zu einem Anstieg von Fehlzusordnungen während sich durch einen zu hohen Schwellwert ggf. Fehlstellen im Oberflächenmodell ergeben können. Die Festlegung dieser Schwellwerte ist u.a. abhängig von der Oberflächentextur, der Bildqualität sowie von der Oberflächengeometrie des Objektes.
- Über die vorhandenen Orientierungsparameter kann, ausgehend vom Referenzbild, die zugehörige Epipolarlinie im Suchbild berechnet werden. Homologe Punkte müssen auf der Epipolarlinie bzw. auf einem schmalen Band beidseitig der Epipolarlinie liegen. Die Breite des Epipolarbandes muss abhängig von der Genauigkeit der Orientierungsparameter festgelegt werden.
- Die erreichte Genauigkeit im Objektraum kann über die statistischen Angaben des räumlichen Vorwärtsschnittes beurteilt werden. Ausreißer lassen sich über die Standardabweichung der Objekt- bzw. Modellkoordinaten sowie über die normierten Verbesserungen der Bildkoordinaten erkennen.
- Zusätzlich können mit Hilfe von Vorwissen über die Objektgeometrie Fehlzusordnungen erkannt und eliminiert werden. So darf bei stetigen Oberflächen die Tiefendifferenz benachbarter Punkte einen vorgegebenen Grenzwert nicht überschreiten.

Im Anschluss an die flächenbasierte Auswertung lassen sich verbliebene Ausreißer in der generierten 3D-Punktwolke durch verschiedene Verfahren detektieren (siehe u.a. SOTOODEH, 2006). Im einfachsten Fall kann in Anlehnung an die in (SCHELLER und SCHNEIDER, 2006) vorgestellte 3D-Separierung von Punkt-Clustern eine Filterung der Punktwolke mit einem dreidimensionalen Strukturelement (Quader) erfolgen. Für jeden Punkt wird dabei das Volumen eines umgebenden Quaders untersucht, wobei für eine vorgegebene Größe des Quaders eine minimale Anzahl benachbarter Punkte innerhalb des Quaders liegen muss. Zweckmäßigerweise werden die Seiten des Quaders parallel zum Objektsystem definiert, so dass eine einfache und schnelle Filterung über Koordinatenbereiche erfolgen kann.

5.4.2 Konturbasierte Auswertung

Aufgrund der in Kapitel 4.5 genannten Probleme bei der Zuordnung von Kanten soll die konturbasierte Auswertung in zwei oder mehr Bildern an dieser Stelle nur sehr kurz der Vollständigkeit halber aufgeführt werden. Mit den untersuchten Verfahren ist eine praktische Nutzung nur für ausgewählte Objekte und nur unter idealen Aufnahmebedingungen möglich. Ein darüber hinausgehender Einsatz in einem anwendungsorientierten Auswertesystem erscheint daher noch nicht sinnvoll.

Bei geeigneter Objektgeometrie und unter günstigen Aufnahmebedingungen kann die konturbasierte Auswertung von Stereo- bzw. Vier-Kamera-Aufnahmen jedoch eine sinnvolle und ggf. auch zeitsparende Ergänzung zur punktbasierten Auswertung darstellen. Unstetigkeiten in der Objektoberfläche können über die flächenbasierte Bildzuordnung nur unzureichend erfasst werden (siehe Kap. 4.3), so dass eine kantenbasierte Auswertung hier zu einer Genauigkeitssteigerung bei der Objekterfassung führen kann. Weitgehend stetige oder gar ebene Objektbereiche lassen sich durch eine (deutlich) geringere Zahl automatisch erfasster Objektpunkte beschreiben, eine hohe Punktdichte bringt hier kaum eine Verbesserung bei der Objektmodellierung. Die explizite Erfassung von Unstetigkeiten mit vergleichsweise wenigen Punkten kann hingegen die Qualität der rekonstruierten Objektgeometrie deutlich verbessern. Voraussetzung dafür sind allerdings robuste und zuverlässige Verfahren zur Kantendetektion und Kantenzuordnung, da ansonsten der Aufwand für die Kontrolle und Nachbearbeitung den Zeitgewinn der automatischen Erfassung aufhebt. Für die konturbasierte Auswertung wird im Rahmen dieser Arbeit daher das in Kapitel 4.5.3 vorgestellte Verfahren über eine interaktive Auswahl geeigneter Kanten vorgeschlagen. Der Auswerter kann dabei das Ergebnis der jeweiligen Messung sofort überprüfen und ggf. korrigieren, Fehlstellen oder falsch zugeordnete Kantenbereiche können durch manuelle Stereomessung ergänzt oder verbessert werden.

5.4.3 Semi-Global Matching

Die bisher besprochenen Verfahren zur automatisierten Oberflächenmessung basieren auf *lokalen* Ansätzen für die Zuordnung ähnlicher Bildbereiche in den beteiligten Aufnahmen. Aus den gewonnenen Punktkorrespondenzen können über die bekannten Bildorientierungen unmittelbar dreidimensionale Objekt- bzw. Modellkoordinaten berechnet und weiterverwendet werden. Dabei können auch statistische Aussagen über die Punktgenauigkeit im Objektraum getroffen werden.

Im Bereich Computer Vision wurden bereits in den 1980er Jahren *globale* Ansätze für die Korrespondenzanalyse untersucht und seither stetig weiterentwickelt. Ein Überblick über verschiedene lokale und globale Verfahren der Stereozuordnung und ihre Leistungsfähigkeit findet sich in (SCHARSTEIN und SZELISKI, 2002). Im Gegensatz zu den lokalen Zuordnungsverfahren wird bei den globalen Verfahren davon ausgegangen, dass alle Grauwertdifferenzen eines Bildpaares über eine globale Funktion minimiert werden können und sich daraus eine pixelweise Zuordnung zwischen den Bildern ergibt. Die Verfahren unterscheiden sich zum einen in der Berechnung der Grauwertdifferenzen und zum anderen in der Lösung des globalen Minimierungsproblems.

In (HIRSCHMÜLLER, 2005, 2008) wird mit dem *Semi-Global Matching* ein robustes und schnelles Verfahren vorgestellt, bei dem das globale, und damit sehr aufwändig zu lösende

2D-Minimierungsproblem durch die Minimierung der auf Grauwertdifferenzen basierenden „Kosten“ entlang einer definierten Anzahl lokaler Pfade approximiert wird.

Als Voraussetzung für die vereinfachte und damit sehr schnelle Berechnung müssen die Bilder streng dem Normalfall der Stereophotogrammetrie entsprechen und frei von Einflüssen der Objektivverzeichnung sein. Hierzu werden die Originalbilder zunächst entzeichnet und anhand der Orientierungsparameter (relative Orientierung, Kamera- und Zusatzparameter) in Normalbilder umgebildet (siehe LUHMANN, 2000). Neben der in Kapitel 3.2.3 vorgestellten relativen Orientierung unabhängiger Bildpaare wird dabei häufig die aus dem Bereich Computer Vision stammende algebraische Repräsentation der Epipolargeometrie über die Fundamentalmatrix verwendet (siehe u.a. HARTLEY und ZISSERMAN, 2003; RODEHORST, 2004).

In den Normalbildern lässt sich der Suchraum für die Zuordnung identischer Bildpunkte auf die gleiche Bildzeile eingrenzen. Die „Kosten“ werden dabei aus den Grauwertdifferenzen der jeweiligen Disparitäten (entspr. den x-Parallaxen beim Stereonormalfall, siehe Kap. 5.2.1) berechnet, wobei die in Kap. 4.3 vorgestellten Verfahren zur flächenbasierten Bildzuordnung eingesetzt werden. Um auf Disparitätssprünge in der Nachbarschaft der zentralen Pixelposition p reagieren zu können, wird eine „Energiefunktion“ $E(D)$ eingeführt, die zusätzlich die Disparitätswerte (x-Parallaxen) in einer Nachbarschaft q berücksichtigt. Ziel des SGM ist nun die Minimierung dieser Energiefunktion $E(D)$.

Als Ergebnis des SGM erhält man für jedes Normalbild ein zugehöriges, gleich großes Tiefenbild (disparity map), das für jedes Pixel einen Tiefenwert enthält. Aus den Disparitäten eines Tiefenbildes können anschließend über die bekannten Orientierungsparameter 3D-Koordinaten im Objekt- bzw. Modellraum berechnet werden. Mehrere Tiefenbilder einer Objektszene müssen durch eine Zusammenführung in ein einheitliches 3D-Objektmodell überführt werden. Statistische Aussagen zur erreichten Punktgenauigkeit im Objektraum, wie sie bei der analytischen Photogrammetrie im Zuge der Ausgleichsrechnung „abfallen“, erhält man zunächst nicht.

Aufgrund der notwendigen Voraussetzungen zur Anwendung des Verfahrens (strenger Stereonormalfall bzw. Berechnung von Normalbildern) sowie der genannten Einschränkungen hinsichtlich der Ergebnisse (Tiefenbilder statt 3D-Objektkoordinaten, keine Genauigkeitsaussagen) wurde das Semi-Globale Matching im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. In (HIRSCHMÜLLER, 2011; ROTHERMEL u. a., 2012; WENZEL u. a., 2013) werden Anwendungsgebiete und konkrete Implementierungen des SGM vorgestellt.

5.5 Structure-from-Motion - SfM

In den Kapiteln 5.1 bis 5.4 wird der gesamte Prozess der 3D-Geometrie-Rekonstruktion aus zweidimensionalen Bildern aus Sicht und mit den Verfahren der analytischen und digitalen Photogrammetrie beschrieben. Mit Hilfe der vorgestellten Verfahren zur Bildverarbeitung und -analyse (Kap. 4) lässt sich dieser Prozess, angefangen von der Bildorientierung inklusive Kamerakalibrierung bis hin zur Generierung dichter 3D-Punktwolken, weitgehend automatisieren, wobei nur noch minimale Objektinformationen, z.B. in Form eines Maßstabes zur Skalierung benötigt werden.

Auch im Bereich Computer Vision sollen häufig aus digitalen Bildern dreidimensionale Objektinformationen rekonstruiert werden, u.a. für die Positionsbestimmung und Navigation von Robotern, die automatische Generierung von CAD-Modellen oder die Erzeugung virtueller Welten. Für den Prozess der simultanen Bestimmung von Bildorientierungen, Kameraparametern und 3D-Objektgeometrie hat sich in diesen Anwendungsbereichen der Begriff *Structure-from-Motion* - *SfM* etabliert (ULLMAN, 1979; POLLEFEYS u. a., 1999; KNILL und RAMIREZ-HERRAN, 2007). Im Gegensatz zu (klassischen) photogrammetrischen Anwendungen, bei denen häufig bekannte Referenzinformationen am Objekt sowie kalibrierte Kameras zum Einsatz kommen/kamen, um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erreichen, stand im Bereich Computer Vision von Beginn an die Rekonstruktion von Aufnahme- und Objektgeometrie mit minimaler Vorinformation im Vordergrund, wobei in der Regel unkalibrierte Kameras zum Einsatz kommen. Diese Anforderungen haben zur Entwicklung eleganter und allgemein gültiger Algorithmen, insbesondere zur Kameraorientierung und -kalibrierung, geführt (SZELISKI und TORR, 1998). Im Unterschied zur Architektur- und Nahbereichsphotogrammetrie können im industriellen Bereich bzw. im Bereich Computer Vision häufig vereinfachte geometrische Annahmen über die Objektszene, wie z.B. Ebenen, Geraden, Parallelität oder Rechtwinkligkeit, in die Berechnung eingeführt werden, die u.a. zu vereinfachten Algorithmen führen. Allerdings werden diese zusätzlichen Annahmen über die Objektgeometrie in aktuellen SfM-Implementierungen noch nicht für die Berechnung genutzt.

Durch die zunehmende Nutzung digitaler Amateurkameras für photogrammetrische Anwendungen sowie die Integration automatisierter Verfahren in den Auswerteprozess haben SfM-Verfahren und -Werkzeuge in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Entsprechende Programme stehen als Open-Source-Software (VisualSFM, insight3d, Apero), Webdienste (z.B. Autodesk 123D Catch, Microsoft Photosynth) oder kommerzielle Lösungen (Agisoft PhotoScan, PhotoModeler Scanner) zur Verfügung. Vergleiche und Anwendungsgebiete verschiedener SfM-Lösungen finden sich unter anderem in (NEITZEL und KLONOWSKI, 2011; KERSTEN u. a., 2012; REMONDINO und KERSTEN, 2012; WU, 2013). Insbesondere die kommerziellen Programme sowie die freien Webdienste sind sehr stark auf die reine Anwendersicht optimiert und erlauben nur wenige Aussagen über die verwendete Algorithmik oder zu den erreichten Genauigkeiten bei der Berechnung. Im Vordergrund steht hier vielmehr die schnelle und weitgehend automatisierte Generierung texturierter 3D-Oberflächenmodelle.

Aufnahmesystem / Optik	Nikon D300 S (12 MPixel), 14 mm Festbrennweite
Aufnahmeabstand / Basis	ca. 5 m / ca. 1 m
Orientierungsverfahren	Bündelblockausgleichung / SfM
Objektreferenz	12 Passpunkte
Anzahl Verknüpfungspunkte	4.544
Standardabweichung der Bildkoordinaten	$\sigma_0 = 0,473 \text{ Pixel}$
Ergebnisse	texturiertes 3D-Modell, Orthobild, Grundriss, Schnitte

Tabelle 5.4: Ergebnisse der automatisierten Bildauswertung mit SfM (Agisoft Photoscan)

Abbildung 5.15 zeigt das Ergebnis einer durch Anwender aus dem Bereich Architektur / Bau-forschung erstellten photogrammetrischen Dokumentation eines Teilbereiches der Cottbuser Stadtmauer. Das Objekt wurde mit einer Nikon D300 (12,3 Megapixel) mit 14 mm Festbrennweitenobjektiv mit insgesamt 69 Aufnahmen erfasst. Die Auswertung erfolgte weitgehend automatisiert mit der Software Photoscan der Firma Agisoft LLC. Abbildung 5.15(a) zeigt die Aufnahmekonfiguration sowie die texturierte Punktwolke als Ergebnis der automatisierten Oberflächenmessung (ca. 40 Mio. Punkte). In Abbildung 5.15(b) sind die farbcodierten

6 Kombinierte Auswerteverfahren

Durch eine Integration der in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Verfahren der analytischen und digitalen Photogrammetrie sowie zur Bildverarbeitung und zur automatisierten Auswertung lässt sich ein kombiniertes Auswertesystem für die Nahbereichsphotogrammetrie konzipieren. Besondere Berücksichtigung müssen dabei die Anforderungen der Anwender aus Bauforschung, Archäologie, Denkmalpflege und Restaurierung an die Ergebnisse einer photogrammetrischen Auswertung finden. Die Erfahrungen aus zahlreichen Forschungs- und Dienstleistungsprojekten zeigen, dass die *zweidimensionale* Objektdokumentation in Form von Bildplänen und daraus abgeleiteten Schnitt- und Ansichtsdarstellungen nach wie vor die wichtigste Grundlage für die Erfassung, Dokumentation und Untersuchung baulicher Substanz darstellt (siehe u.a. HEMMLEB u. a., 2001; SIEDLER und SACHER, 2007; RHEIDT und ROHN, 2011; RIEDEL u. a., 2011). Die Ableitung entsprechender Ergebnisse aus der (eigentlich) dreidimensionalen Stereo- oder Mehrbildauswertung bildet daher einen Schwerpunkt bei der folgenden Konzeption eines anwendungsbezogenen Auswertesystems.

6.1 Kamerakalibrierung

In den hier fokussierten Anwendungsbereichen kommen für die photogrammetrische Aufnahme vorwiegend digitale Amateurkameras zum Einsatz, deren innere Orientierung in der Regel nicht stabil ist. Vorbereitend für eine räumliche Bildauswertung müssen daher anwendungsorientierte Verfahren für die Bestimmung von Kameraparametern entsprechend den Ausführungen in Kapitel 5.1 bereitgestellt werden. Insbesondere vereinfachte Verfahren, bei denen die Abbildungsfehler des Objektivs (Verzeichnungsparameter) als bekannt und stabil vorausgesetzt werden und jeweils nur die Parameter für Bildhauptpunkt und Kamerakonstante zu bestimmen sind, sollten hier zur Anwendung kommen (vergleiche Kap. 5.1.3). Hierfür können durch das System definierte Aufnahmekonfigurationen vorgegeben werden, die sich vor Ort leicht realisieren lassen. Die Messung homologer Punkte für die Bestimmung der Kameraparameter kann über Interest-Operatoren und anschließende Bildzuordnungsverfahren (siehe Kap. 4.3) mit sehr hoher Genauigkeit und weitgehend automatisch erfolgen.

Eine Bestimmung der Verzeichnungsparameter für die eingesetzten Optiken kann mit entsprechenden Vorgaben durch die Software ebenfalls vom Anwender selbst durchgeführt werden. Da für diese Aufnahmen aber in der Regel ein Testfeld mit einer sehr hohen Punktzahl notwendig ist, wird eine initiale Kalibrierung durch einen Dienstleister oder ein photogrammetrisches Institut vorgeschlagen. Die hierbei ermittelten Werte für Kamerakonstante und Bildhauptpunkt können als Näherungswerte für die jeweils aktuelle Kalibrierung vor Ort verwendet werden.

Mit aktuellen Verfahren zur automatisierten Bildauswertung (z.B. Structure-from-Motion, Kap. 5.5) lassen sich die Kamera- und Verzeichnungsparameter für alle beteiligten Kameras/Bilder im Zuge der Bildorientierung mitbestimmen (Simultankalibrierung, Kap. 5.1.2).

Voraussetzung für eine stabile Bestimmung der Parameter ist eine genügend große Anzahl über den gesamten Bildraum verteilter Verknüpfungspunkte. Diese können automatisch mit Hilfe von Interest-Operatoren und Bildzuordnung gemessen werden.

6.2 Bildorientierung

Die Grundlage für die räumliche Auswertung von Stereo- oder Mehrbildaufnahmen ist die Orientierung der Bilder in einem gemeinsamen Objekt- oder Modellkoordinatensystem. Mit den in Kapitel 5.3 vorgestellten Verfahren zur Bildorientierung lässt sich dieser Prozess weitgehend automatisieren. Eine Kernfunktionalität stellt dabei die relative Orientierung, basierend auf der automatischen Extraktion und Zuordnung markanter Punkte in zwei oder mehreren Bildern dar (Kap. 4.2 und 4.3). Für eine Verknüpfung mehrerer relativ orientierter (Stereo-) Modelle können identische Punkte am Objekt sowohl automatisch als auch interaktiv bestimmt werden. Die Messung signalisierter Passpunkte, z.B. für eine absolute Orientierung, kann mit Hilfe der in Kapitel 3.3.1 vorgestellten Verfahren automatisiert mit sehr hoher Genauigkeit erfolgen.

Als Alternative zur absoluten Bild- bzw. Modellorientierung über photogrammetrisch bestimmte Passinformationen bietet sich eine nachträgliche Referenzierung von Stereomodellen über automatisch bestimmte Oberflächengeometrien entsprechend Kapitel 5.3.7 an. Die z.T. sehr aufwendige Suche nach homologen Punkten in mehreren Bildern entfällt damit vollständig und wird durch eine zuverlässige und für den Anwender sehr anschauliche Zuordnung über die Geometrie des erfassten Objektes ersetzt.

6.3 Interaktive Stereo- und Mehrbildauswertung

Eine zentrale Komponente innerhalb des vorgeschlagenen Konzeptes bildet die interaktive Auswertung von Stereo- bzw. Vier-Kamera-Modellen. Mit Unterstützung automatisierter Zuordnungsverfahren können hierbei zunächst diskrete Objektgeometrien durch den Anwender selbst dreidimensional gemessen werden. Durch die Bereitstellung einfacher CAD-Funktionalitäten (u.a. Grundgeometrien, Layer, Objektfang) kann damit eine grafische Objektauswertung sowohl für 2D-Pläne (Ansichts- oder Schnittdarstellungen) als auch für 3D-Modelle erfolgen.

Die für die Generierung zweidimensionaler Bildpläne benötigten Referenzinformationen können ebenfalls mit Hilfe der interaktiven Stereoauswertung bestimmt werden (z.B. Festlegung der Abbildungsebene für eine projektive Entzerrung, Messung zusätzlicher Passpunkte, Bestimmung der Objektgeometrie für eine Abwicklung). Die tachymetrische Messung vor Ort kann damit deutlich reduziert werden bzw. ganz entfallen.

Ebenfalls im Rahmen der interaktiven Auswertung können durch den Anwender Ansichts- und Schnittsysteme (objektbezogene Koordinatensysteme) definiert werden, die u.a. für projektive Abbildungen, Profilmessungen oder für eine grafische 2D-Auswertung benötigt werden.

Mit Hilfe automatisierter Messverfahren (siehe Kap. 5.4) kann die Objektoberfläche schließlich mit einer sehr hohen Punktdichte weitgehend automatisch „abgetastet“ werden. Im

Vorfeld wird vom Anwender interaktiv der Bereich für die Oberflächenmessung sowie die notwendigen Parameter für die Punktzuordnung und die Punktdichte festgelegt.

6.4 3D-Modellbildung

Der Prozess der 3D-Modellierung auf der Grundlage automatisiert bzw. interaktiv gemessener Objektgeometrien geht z.T. deutlich über die Funktionalitäten einer photogrammetrischen Auswertesoftware hinaus und soll hier nur kurz behandelt werden.

Als Ergebnis der automatisierten Auswertung erhält man zunächst dichte Punktwolken der Objektoberfläche, die ggf. um interaktiv gemessene Geometrien, wie Bruchkanten, ergänzt werden. In einem ersten Schritt werden die Ergebnisse der automatisierten Messung bereinigt, d.h. es werden mit geeigneten Filtermethoden Ausreißer eliminiert (siehe Kap. 5.4.1). Eine Triangulation der verbleibenden Oberflächenpunkte sowie die Texturierung der Dreiecksflächen mit den Bildinformationen der beteiligten Stereoaufnahmen sollte zweckmäßigerweise ebenfalls noch innerhalb der Auswertesoftware stattfinden, da hier der Bezug zwischen den Aufnahmen und den Objektpunkten über die Orientierungsparameter bekannt ist. Die hier entstandenen Oberflächenmodelle werden vor allem als Grundlage für die Generierung von Bildplänen im Rahmen einer Orthobildentzerrung oder einer Abwicklung weiter benötigt (siehe Kap. 6.5).

In der Regel reicht jedoch eine einfache Triangulation der gemessenen Punkte nicht aus, um qualitativ hochwertige Oberflächenmodelle zu erzeugen. Vielmehr schließen sich, je nach Anforderung an das Modell, oft weitere Modellierungsschritte an. So müssen z.B. Fehlstellen unter Berücksichtigung der unmittelbaren Umgebung durch angepasste Interpolationsverfahren geschlossen werden. Komplexe Objekte lassen sich erst durch Kombination von interaktiv gemessenen Konturinformationen (z.B. Bruchkanten) und automatisch gemessenen Oberflächenpunkten bis ins Detail modellieren. Für die Weitergabe von Modellen erfolgt häufig eine Reduktion der Polygonzahl, die dynamisch in Abhängigkeit der Oberflächenstruktur angepasst und durch weitere Glättungs- oder Abrundungsprozesse ergänzt wird. Darüber hinaus kann die Polygonanzahl durch Approximation von Regelgeometrien (z.B. Ebene, Zylinder, Kegel) für ausgewählte Objektbereiche weiter deutlich reduziert werden. All diese Funktionen sind Bestandteil spezieller Modellierungsprogramme u.a. aus dem Bereich des „Reverse Engineering“ und z.T. nach wie vor Thema aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

6.5 Generierung von Bildplänen

Für die Dokumentation und weiterführende Untersuchung historischer Objekte kommen nach wie vor zweidimensionale Plandarstellungen zum Einsatz (BURWITZ u. a., 2013). Die Objekte werden hierbei in definierten Grundrissen, Schnitten und Ansichten maßstäblich abgebildet, was das Erkennen räumlicher Zusammenhänge erleichtert und vergleichende Analysen erst möglich macht. Als geometrische Grundlage für die Erstellung zeichnerischer Planunterlagen werden dabei häufig maßstäbliche Bildpläne verwendet, die über ihre fotografische Darstellung, neben der Objektgeometrie, weitere Informationen, u.a. zum Erhaltungszustand,

zur Bearbeitungsqualität oder zur Farbigkeit der erfassten Objekte, liefern. In einem anwendungsbezogenen Auswertesystem muss der Bearbeiter daher die Möglichkeit haben, aus den photogrammetrischen Aufnahmen sowie zusätzlichen Objektinformationen entsprechende Bildpläne zu generieren. Die hierfür notwendigen Funktionen sollen im Folgenden kurz beschrieben werden.

6.5.1 Festlegung von Projektions- und Schnittsystemen

Die Grundlage für alle Verfahren zur Erstellung maßstäblicher Bildpläne sowie zur Ableitung zweidimensionaler Schnittgeometrien ist die Definition entsprechender Projektions- bzw. Schnittsysteme in Abhängigkeit der Objektgeometrie sowie der fachlichen Fragestellung. Die Festlegung der hierfür notwendigen Objektinformationen (z.B. drei Objektpunkte, eine Richtung und ein zusätzlicher Punkt) kann interaktiv durch stereoskopische Messung oder direkt im 3D-Modell erfolgen. Bei geeigneter Objektgeometrie kann die Festlegung aber auch über die automatische Einpassung von Regelgeometrien (Ebene, Zylinder, Kegel) in die Oberfläche des 3D-Modells erfolgen, ggf. ergänzt um die interaktive Festlegung der Systemausrichtung.

6.5.2 Projektive Entzerrung

Voraussetzung für eine projektive Entzerrung ist, dass sich der auszuwertende Objektbereich im Rahmen der geforderten Genauigkeit als Ebene beschreiben lässt (siehe Kap. 3.3.2.2). Die Definition der Entzerrungsebene kann durch interaktive oder automatisierte Messung in einem Stereo- bzw. Mehrbildauswertesystem erfolgen. Im einfachsten Falle reicht hierfür die Messung von drei Punkten in der betreffenden Objektebene. Die Ebenenbestimmung kann aber auch durch automatisierte Messung von Oberflächenpunkten und Berechnung einer ausgleichenden Ebene erfolgen. Die Ausrichtung des Zielsystems richtet sich nach dem jeweiligen Objektbereich und kann durch Festlegung einer Hauptachse (zwei Punkte = eine Richtung) am Objekt erfolgen (siehe Abb. 7.4(b)).

Wurden Entzerrungsebenen durch Messungen direkt am Objekt bestimmt (z.B. durch tachymetrische Messungen, Laserscanning oder Handaufmaß), muss die Möglichkeit bestehen, diese Daten zu importieren und die zugehörigen Bildinformationen (Koordinaten, Strecken, Richtungen) in den Bildern zu messen.

Für die Generierung eines maßstäblichen Bildplanes müssen schließlich der Maßstab und die Auflösung des Zielbildes, der Entzerrungsbereich sowie ggf. weitere Angaben zum Bildplan festgelegt werden. Werden zur Erstellung eines Bildplanes mehrere entzerrte Aufnahmen kombiniert, müssen sich die Referenzinformationen für alle beteiligten Bilder auf das gleiche Objektkoordinatensystem beziehen.

6.5.3 Orthobilderstellung

Bei der Erstellung eines Orthobildes werden über ein digitales Oberflächenmodell die Grau- bzw. Farbwerte von orientierten Bildern orthogonal auf eine Projektionsebene (Orthobildebene) umgebildet (siehe Kap. 3.3.2.4). Hierfür müssen die Orientierungsdaten der beteiligten

Bilder (innere und äußere Orientierung, Kameraparameter) sowie ein digitales Oberflächenmodell (DOM) des auszuwertenden Objektbereiches vorliegen. Das DOM kann durch automatisierte Stereo- oder Mehrbildauswertung aus den beteiligten Aufnahmen (Kap. 5.4) oder über den Import von Scannerdaten unabhängig von den Bildern erzeugt werden. Für einfache, regelmäßig gegliederte Objektbereiche können Oberflächenmodelle auch aus wenigen tachymetrisch oder photogrammetrisch bestimmten Daten konstruiert werden.

Die Festlegung der Projektionsebene entspricht der in Kapitel 6.5.2 beschriebenen Definition einer Entzerrungsebene. Auch hier müssen die gleichen flexiblen Werkzeuge zur Festlegung eines ebenen Projektionssystems zur Verfügung stehen.

Schließlich müssen für den zu erstellenden Orthobildplan Maßstab und Auflösung festgelegt werden. Da sich die Orientierungen der Ausgangsbilder auf das gleiche Objektkoordinatensystem beziehen, in dem auch das DOM und die Orthobildebene bestimmt wurden, werden die zugehörigen Orthobilder automatisch an die richtige Position im Orthobildplan projiziert.

6.5.4 Abwicklung

Auch die Abwicklung basiert auf dem Vorhandensein orientierter Bilder sowie einer geometrischen Beschreibung der Objektoberfläche (siehe voriges Kapitel). Beim Standardfall einer Abwicklung werden Zylinder- oder Kegelflächen für eine maßstäbliche Abbildung flächentreu in eine Abwicklungsebene umgebildet (siehe Kap. 3.3.2.3). Ein photogrammetrisches Auswertesystem muss also die Möglichkeit zur Bestimmung bzw. Festlegung dieser Objektgeometrien bieten. Dies kann interaktiv durch manuelle Messung weniger Punkte (z.B. Zylinderachse und Radius) oder durch automatisierte Messung vieler Oberflächenpunkte (z.B. Manteloberfläche eines Kegelstumpfes, siehe Kap. 7.3 bzw. Abb. 7.5(b)) erfolgen.

Da wiederum ein maßstäblicher Bildplan erstellt werden soll, müssen auch hier Maßstab, Auflösung und Auswertebereich für das Zielbild interaktiv festgelegt werden.

Nicht flächentreue Abwicklungen sphärischer Flächen, vor allem für Restaurierungszwecke, werden u.a. in (HEMMLEB und WIEDEMANN, 1997; HEMMLEB und SUTHAU, 1999) vorgestellt. Da es sich hier jedoch um Spezialfälle handelt, bei denen in der Regel erweiterte photogrammetrische Kenntnisse und Erfahrungen vorhanden sein müssen, soll an dieser Stelle nicht detailliert auf konkrete Algorithmen eingegangen werden.

6.6 Entwurf eines kombinierten Auswertesystems

Aus den in den Abschnitten 6.1 bis 6.5 beschriebenen Anwendungsfällen lassen sich die grundlegenden Komponenten eines kombinierten Auswertesystems für die Architektur- und Nahbereichsphotogrammetrie definieren. Bei der Gliederung der Komponenten wird im Folgenden zwischen *mathematisch-photogrammetrischen Grundfunktionen*, die für das gesamte System zur Verfügung stehen, und den eigentlichen *Auswertefunktionen* unterschieden. Zudem müssen verschiedene Schnittstellen für *Eingangsdaten* sowie für die *Ergebnisse* der photogrammetrischen Auswertung integriert werden.

Eingangsdaten

- Digitale Bilder: Grundlage eines photogrammetrischen Auswertesystems, Unterstützung der wichtigsten Formate (TIFF, JPEG)
- Orientierungsdaten: Möglichkeiten zum Import von Orientierungs- und Kameraparametern aus verschiedenen Formaten
- Referenz-Informationen: für absolute Orientierung und Modellskalierung, Passpunkte für Entzerrung, Referenzstrecken, gemessene Geometrien (Abstände, Höhen)
- 2D/3D-Geometrien: vorhandene CAD Modelle oder Punktwolken als Grundlage für die interaktive Bildauswertung oder als Referenz-Informationen

Vorverarbeitung / mathematisch-photogrammetrische Grundfunktionen

- Bilderverarbeitung: Verwaltung digitaler Bilder (Bild anlegen, kopieren, initialisieren), Funktionen zur geometrischen Transformation (Rotation, Projektionen, Skalierung), zur radiometrischen Transformation (Helligkeit, Kontrast, Histogrammanpassung), Verfahren zur Grauwertinterpolation, Import-/Export-Schnittstellen für gängige Bildformate (JPEG, TIFF)
- Bildanalyse: diverse Filter (Glättung, Kanten), Interestoperatoren (Förstner, SIFT, FAST), Kantenextraktion und -zuordnung, flächenbasierte Bildzuordnung/Matching, Punktoperatoren (Schwerpunkt, Ringoperator), Konturverfolgung
- Analytische Photogrammetrie: relative/absolute Orientierung, Kollinearitätsgleichungen, Epipolarometrie, Kamerakalibrierung, Vorwärts-/Rückwärtsschnitt, Bündelausgleichung, projektive Transformation, Import-/Export-Schnittstellen für Orientierungs- und Kameraparameter
- Allgemeine Analytik: 2D/3D-Koordinaten-Transformationen (Affin-, Ähnlichkeitstransformation), geometrische Berechnungen (Schnittberechnungen, Projektionen)
- 2D/3D-Geometrie: Verwaltung von Vektorgeometrien (Punkte, Linien, Polygone, TIN), einfache CAD-Funktionalitäten, Verwaltung von Punktwolken, Import-/Export-Schnittstellen für Vektorgeometrien (DXF, VRML) und Punktwolken

Auswertung, Nachbearbeitung

- Generierung von Bildplänen: Messung von Passpunkten, Verwaltung von Projektions- bzw. Abbildungssystemen, Festlegung von Maßstab, Auflösung und Auswertebereich für Entzerrung, Abwicklung und Orthobildentzerrung, Montage von Einzelbildern zu Bildplänen
- Interaktive Stereo-/Mehrbildauswertung: stereoskopische Messung von Vektorgeometrien, einfache 2D/3D-Konstruktion, Messung von Referenz-Informationen und Festlegung von Abbildungssystemen für die Erstellung von Bildplänen, Festlegung von Bereichen und Parametern für die automatisierte Auswertung

- Automatische Stereo-/Mehrbildauswertung: dichte Stereoauswertung (automatische Messung von Oberflächenpunkten), punktbasierte Profilmessung, Kantenextraktion und -zuordnung
- Punktwolkenbearbeitung: Filterung, Reduktion/Ausdünnung, Ausreißererkennung, manuelle Auswahl und Bearbeitung, Vermaschung und Texturierung, Punktwolken-Matching (ICP)

Ergebnisse

- Maßstäbliche Bildpläne: als Ergebnis von Entzerrung, Abwicklung und Orthobildgenerierung
- 2D-Auswertungen: Koordinaten, Maße oder CAD-Zeichnungen für definierte Abbildungssysteme (Ansichten, Schnitte)
- 3D-Produkte: Punktwolken, vermaschte und texturierte Oberflächenmodelle, CAD-Modelle, Koordinaten und Maße

Abbildung 6.1 zeigt den Zusammenhang dieser Komponenten in vereinfachter Form.

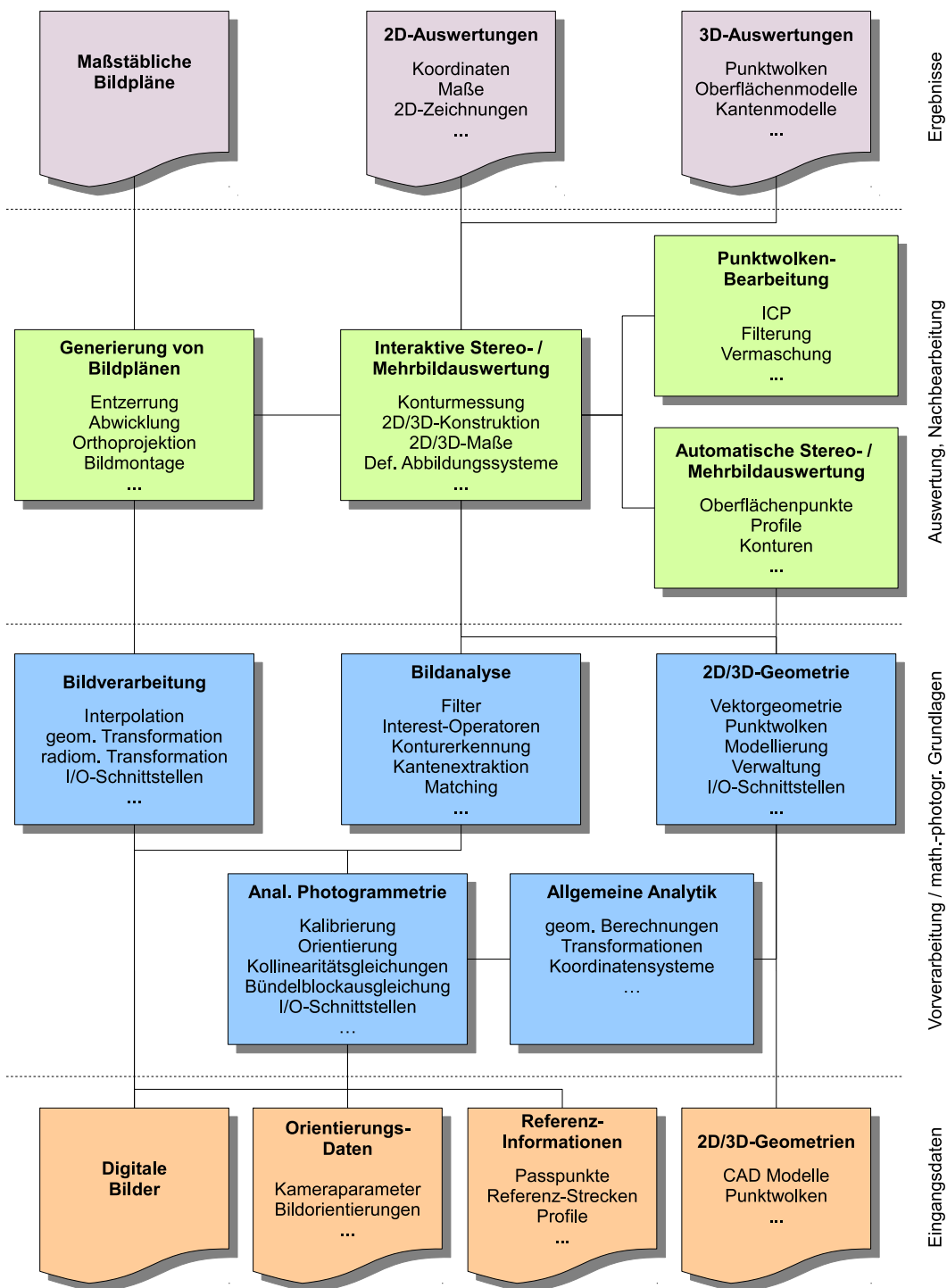


Abbildung 6.1: Komponenten eines kombinierten Auswertesystems für die Anwendung in der Architektur- und Nahbereichsphotogrammetrie

7 Anwendungsbeispiele

7.1 Dokumentation archäologischer Kleinfunde

Für die Dokumentation archäologischer Kleinfunde (Objektgröße < 10 cm, z.B. Keramik, Scherben) werden neben der Oberflächenbeschaffenheit und dem Material der Funde u.a. auch Form und Maße erfasst (KUNOW, 1986). Klassischerweise erfolgt dies mit Hilfe einfacher Mittel, wie Messschieber, Geodreieck und Profilkamm, wobei wichtige Fundstücke zusätzlich durch eine händische Zeichnung dokumentiert werden (siehe u.a. WIEGMANN, 2005). Die Dokumentation erfolgt in der Regel vor Ort und ist bei größeren Grabungsprojekten z.T. mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden. Um diesen Zeitaufwand vor Ort zu reduzieren wurde ein Konzept zur automatisierten Kleinfunderfassung mittels Stereophotogrammetrie entwickelt und anhand zahlreicher Fundobjekte getestet.

Zur vollständigen Erfassung der Funde wurde ein Referenzrahmen entwickelt, in den das aufzunehmende Objekt fest eingespannt werden kann (Abb. 7.1). Auf dem Rahmen sind beidseitig Passmarken aufgebracht, deren Koordinaten im Zuge einer photogrammetrischen Mehrbildauswertung bestimmt wurden. Mit Hilfe dieser Passpunkte lassen sich Stereomodelle der Ober- und Unterseite sowie ggf. weitere Schrägaufnahmen in einem einheitlichen Objektkoordinatensystem absolut orientieren und ermöglichen damit eine (weitgehend) vollständige Erfassung der Objekte.

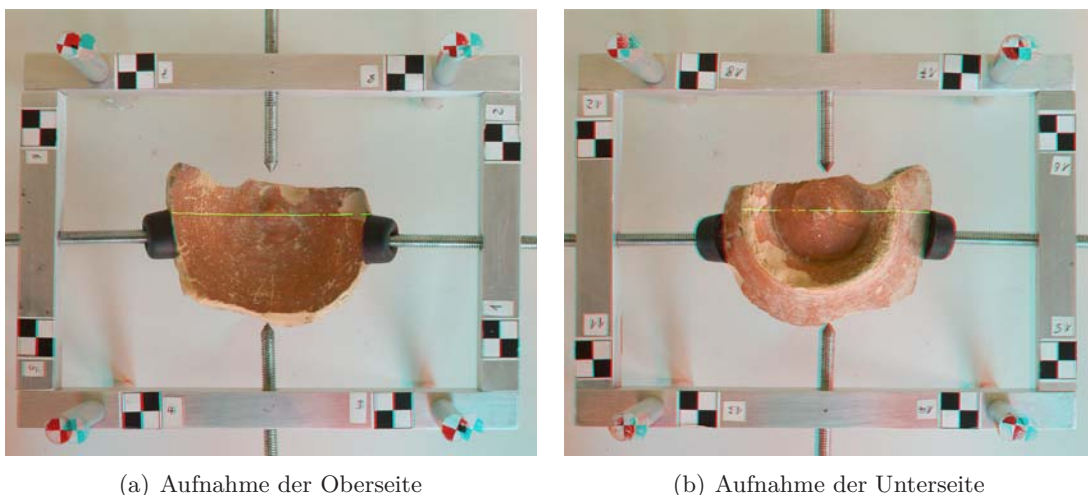


Abbildung 7.1: Referenzrahmen zur Erfassung von Kleinfunden (Anaglyphendarstellung), grün: automatisch gemessene Profillinie

Die Aufnahme kann mit nur einer kalibrierten Kamera erfolgen, die fest oberhalb des Rahmens montiert wird. Zur Realisierung der Stereobasis wird lediglich der Referenzrahmen

mit dem Objekt zwischen beiden Aufnahmen verschoben, die Parameter der absoluten Orientierung ergeben sich dann aus den bekannten Koordinaten der Passpunkte.

Die Messung der Passpunkte für die relative und absolute Orientierung erfolgt automatisiert mit Hilfe des in Kapitel 4.4.3 vorgestellten Ring-Operators (LUHMANN, 1986). Dabei können aufgrund der eindeutigen Anordnung der Passpunkte auf dem Rahmen sofort auch die entsprechenden Punktnummern zugeordnet werden.

Nach der Bildorientierung erfolgt die Auswertung aller Stereomodelle im Koordinatensystem des Referenzrahmens, so dass die gemessenen 3D-Informationen sofort in einem einheitlichen Objektmodell zusammengeführt werden können. Die Schnittprofile wurden über eine objektbasierte Auswertung (Kap. 5.4.1) automatisiert bestimmt. Die Richtung der Schnitte verläuft dabei parallel zum Koordinatensystem des Referenzrahmens, so dass das Objekt für eine sinnvolle Schnittdarstellung entsprechend im Rahmen ausgerichtet sein muss. Zusätzlich zur Messung einzelner Profile kann für eine 3D-Modellierung die Objektoberfläche durch automatische Messung vollständig erfasst werden.

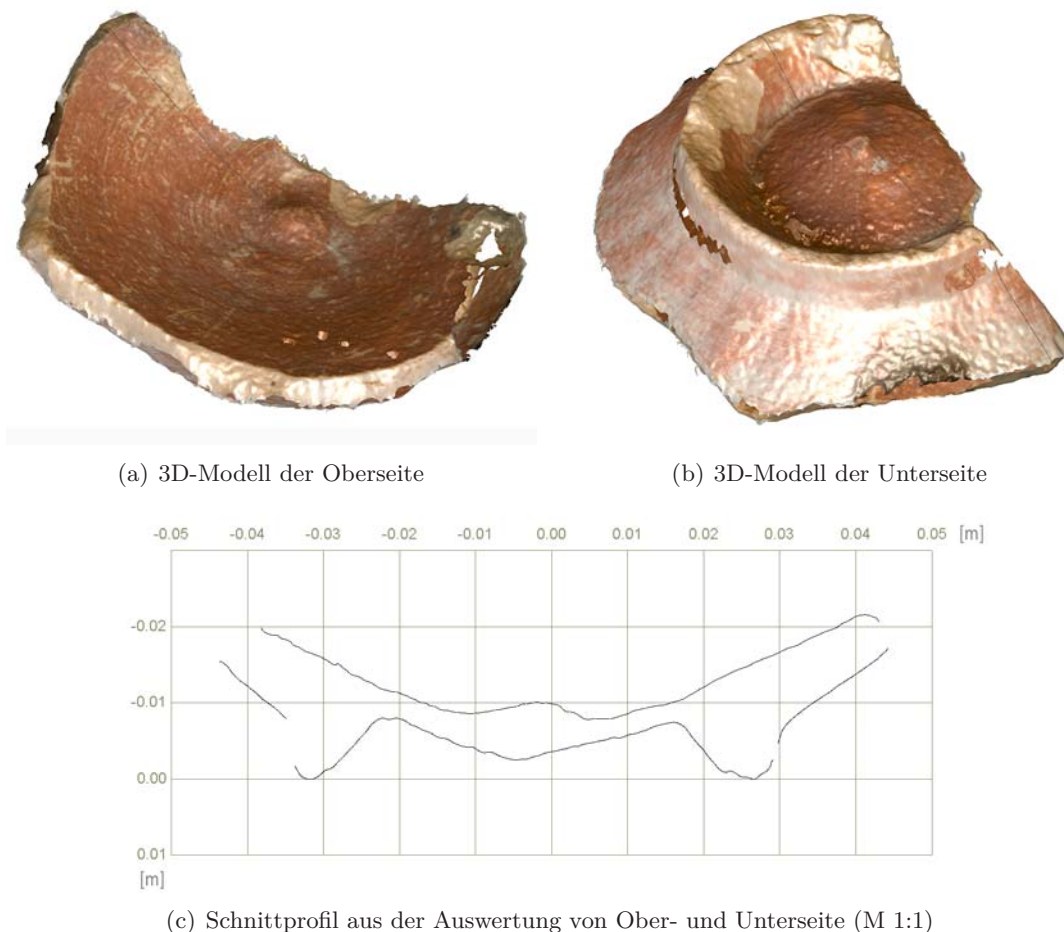


Abbildung 7.2: Ergebnisse der automatisierten Erfassung von Kleinfunden

Als Aufnahmesystem kam eine Fuji FinePix S2 Pro mit 35 mm Festbrennweitenobjektiv zum Einsatz, der Aufnahmeabstand betrug ca. 45 cm, der Basisabstand ca. 5 cm. Damit ergibt sich bei automatischer Punktzuordnung eine Genauigkeit in Aufnahmerichtung von

ca. 0,1 mm (siehe Kap. 2.3.2), was den Anforderungen an die Dokumentation derartiger Funde entspricht.

Anwendungsbeispiel	Dokumentation Kleinfunde
Aufnahmesystem / Optik	Fuji FinePix S2 Pro (12 MPixel), 35 mm Festbrennweite
Aufnahmeabstand / Basis	45 cm / 5 cm
Orientierungsverfahren	relative / absolute Orientierung
Objektreferenz	Passpunkte
Anzahl Stereomodelle	mind. 2 (Ober- und Unterseite)
Ergebnisse	3D-Modell, Profile, Ansichten

Tabelle 7.1: Zusammenfassung Dokumentation Kleinfunde

Durch die weitgehende Automatisierung kann mit dem gezeigten Verfahren in sehr kurzer Zeit eine große Anzahl von Funden erfasst und bereits vor Ort ausgewertet werden. Für die Untersuchungen wurden zunächst vor Ort die Aufnahmen erstellt und erst im Nachhinein erfolgte die Orientierung und Auswertung (Offline-System). Über eine entsprechende Kameraraschnittstelle in Verbindung mit einem (mobilen) Rechner lässt sich das System aber auch als Online-System realisieren. Die Steuerung der Kamera (Belichtungszeit, Blende und Auslösung) erfolgt dann vom Rechner aus und die erstellten Aufnahmen können sofort orientiert und ausgewertet werden.

Verfahrensbedingt kann es in texturarmen Bereichen, z.B. bei sehr fein gearbeiteten oder beschichteten Keramiken, zu einem Versagen der grauwertbasierten Punktzuordnung kommen. Eine automatische Stereoauswertung dieser Objekte ist dann nicht möglich. Ebenso können in Bereichen mit größerer Abweichung zwischen Oberflächennormale und Aufnahmerichtung Probleme bei der Punktzuordnung auftreten. Für eine vollständige Erfassung müssen bei entsprechenden Objekten dann zusätzliche Stereomodelle erstellt werden, was jedoch den Aufwand für Orientierung und Auswertung erhöht.

7.2 Erfassung und Dokumentation von Bauteilfragmenten

Die maßstabsgerechte Erfassung und Dokumentation historischer Bausubstanz ist wesentlicher Bestandteil der archäologischen Bauforschung. Im ersten Schritt, der Bauaufnahme, erfolgt dabei eine Annäherung an das Objekt durch Messen, Beobachten, Zeichnen und Beschreiben (RIEDEL u. a., 2011). Die Ergebnisse der Bauaufnahme, darunter maßstäbliche Zeichnungen, Bildpläne und 3D-Modelle, bilden dann die Grundlage für die eigentliche Analyse und Erforschung des Objektes im Rahmen der Bauforschung. Einen Überblick über aktuelle Verfahren der Bauaufnahme und der Weiterverarbeitung der dabei gewonnenen Daten geben u.a. die Tagungsbände des interdisziplinären Kolloquiums „Von Handaufmaß bis High Tech“, das in den Jahren 2000, 2005 und 2010 von den Lehrstühlen Baugeschichte und Vermessungskunde der BTU Cottbus durchgeführt wurde (WEFERLING u. a., 2002; RIEDEL u. a., 2007; HEINE u. a., 2011) sowie die Proceedings der regelmäßig stattfindenden CIPA-Symposien (<http://cipa.icomos.org>).

Die genaue Dokumentation einzelner Bauteile bzw. Bauteilfragmente bildet oft die einzige Grundlage für die Rekonstruktion nicht mehr vorhandener Architektur. Die Bauteile werden hierfür detailliert vermessen, gezeichnet und beschrieben und in einem sog. Bauteilkatalog

zusammengefasst. Klassischerweise erfolgt die Bauteilaufnahme durch Handaufmaß und ist damit sehr zeitaufwendig. Bei einer sehr großen Anzahl zu erfassender Bauteile kann diese notwendige Arbeit einen Großteil der zur Verfügung stehenden Zeit vor Ort beanspruchen (Abb. 7.3).



Abbildung 7.3: Bauteilfragmente im sog. „Bustan el Khan“ in Baalbek/Libanon

Mit Hilfe der automatisierten Stereoauswertung lässt sich der Aufwand für die Geometrierfassung erheblich reduzieren. Die Aufnahme erfolgt mit dem in Kapitel 5.2 vorgestellten Aufnahmesystem unter Verwendung digitaler Amateurkameras und einer an die jeweiligen Aufnahmebedingungen anpassbaren Stereobasis. Damit ist es möglich, sehr unterschiedliche Objektgrößen mit nur einem Aufnahmesystem zu erfassen. Durch den bekannten Basisabstand beider Kamerastandpunkte können die Modellparameter der relativen Orientierung sofort im richtigen Objektmaßstab berechnet werden, zusätzliche Referenzinformationen am Objekt werden nicht benötigt. Bei Verwendung nur einer Kamera, die vom linken auf den rechten Standpunkt umgesetzt werden muss, sowie zur Kontrolle der relativen Orientierung sollte jedoch grundsätzlich mindestens eine bekannte Strecke im Objektraum mit erfasst werden. Damit lässt sich der Maßstab des Modellsystems nachträglich kontrollieren und ggf. korrigieren. Im einfachsten Falle kann die Streckeninformation durch einen einfachen Maßstab oder eine Nivellierlatte realisiert werden (BOOCHS u. a., 2007).

Für eine vollständige Objekterfassung müssen in der Regel mehrere Stereomodelle aus unterschiedlichen Aufnahmerichtungen erstellt werden. Eine Zusammenführung der einzelnen Modelle kann über identische Objektpunkte im Rahmen einer Bündelausgleichung erfolgen (siehe Kap. 5.3.6). Alternativ können die relativ orientierten Modelle aber auch im Nachhinein über identische Objektgeometrien zueinander referenziert werden (Kap. 5.3.7). In den untersuchten Beispielen zur Bauteilaufnahme erfolgte die Referenzierung der Modelle ausschließlich über identische Objektgeometrien im Anschluss an die automatische Oberflächenmessung (Abb. 7.4(a)). Diese Vorgehensweise entspricht der Registrierung von Punktwolken aus scannenden Verfahren und hat sich als sehr zuverlässig und anschaulich erwiesen.

Die Dokumentation von Bauteilen und Architektur erfolgt üblicherweise in Form zweidimensionaler Ansichtsprojektionen und Schnitte (RIEDEL u. a., 2011). Als Grundlage für ei-

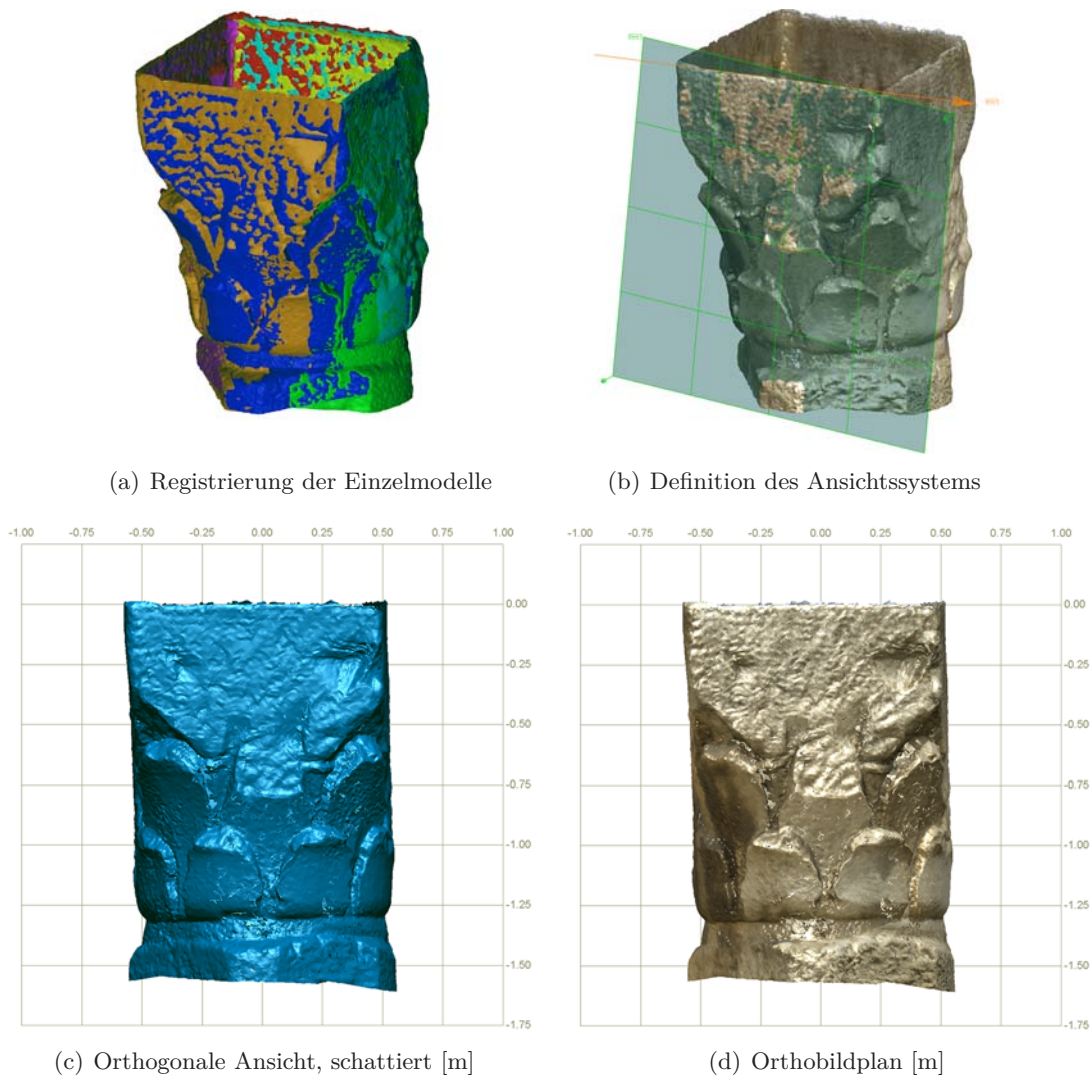
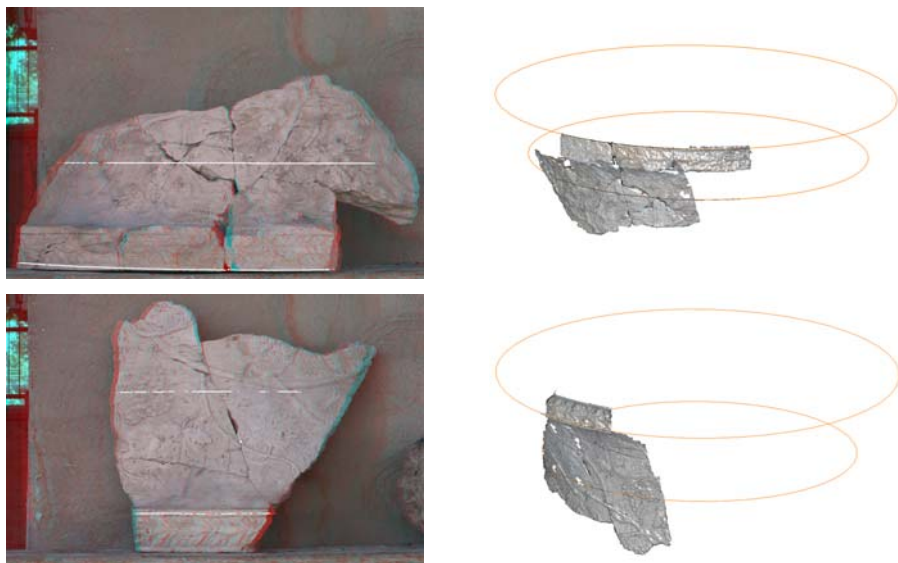


Abbildung 7.4: Ergebnisse der automatisierten Bauteilerfassung

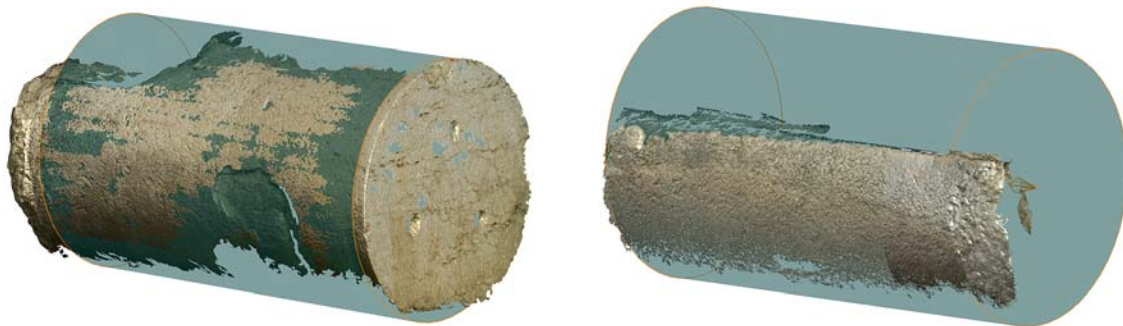
ne detaillierte Zeichnung werden aus den automatisch gemessenen Oberflächengeometrien und den zugrunde liegenden Bildinformationen Orthobildansichten erstellt. Die gemessenen Punktwolken werden hierfür zusammengeführt und durch eine dreidimensionale Vermaschung (z.B. mit Hilfe des Ball-Pivoting-Algorithmus, BERNARDINI u. a., 1999) in ein 3D-Oberflächenmodell überführt (Abb. 7.4(a)). Anschließend erfolgt die Definition einer Projektionsebene für die orthogonale Ansichtsdarstellung durch Auswahl geeigneter Punkte bzw. Objektbereiche im 3D-Modell (ausgleichende Ebene, Ausrichtung des Ansichtssystems, Abb. 7.4(b)) sowie die Festlegung von Maßstab und Auflösung für die Berechnung des Orthobildes entsprechend Kapitel 3.3.2. Das generierte Orthobild wird maßstäblich ausbelichtet bzw. ausgedruckt und dient als Grundlage für die Erstellung einer händischen Kartierung direkt am Objekt (Abb. 7.4(c) und (d)). Dabei können zusätzliche Informationen und Maße berücksichtigt werden, die sich aus der automatischen bzw. interaktiven Stereoauswertung nicht entnehmen lassen. Eine vollständige digitale Auswertung am Rechner, ohne Kontakt zum Objekt, bleibt auf absehbare Zeit die Ausnahme.

7.3 Maßliche Rekonstruktion von Objekten

Neben der Erstellung von Ansichts- und Schnittdarstellungen durch photogrammetrische Umbildung lassen sich aus den Punktwolken der automatischen Oberflächenmessung zudem die Parameter geometrischer Regelkörper auch für kleinere Bauteilfragmente sehr zuverlässig rekonstruieren. Die Grundlage dafür können sowohl 2D-Profilen einer objektbezogenen Auswertung, als auch flächenhaft bestimmte Objektpunkte einer bildbasierten Messung sein (siehe Kap. 5.4.1). Form und Maße der zu bestimmenden Geometrien können dabei direkt aus den Punktwolken der automatischen Stereoauswertung abgeleitet werden, eine weitergehende Auswertung (Triangulation, Texturierung) ist nicht nötig. Entsprechende Verfahren zur Einpassung von Regelgeometrien sind Standardwerkzeuge bei der Verarbeitung von Punktwolken (siehe u.a. VOSSELMAN u. a., 2004).



(a) Bestimmung der Durchmesser antiker Kratere auf der Grundlage objektbasierter Profilmessungen (links: autom. gemessene Profilpunkte in den Anaglyphenbildern)



(b) Einpassung Zylinder/Kegel zur Rekonstruktion flächenhaft erfasster Säulenfragmente

Abbildung 7.5: Rekonstruktion von Bauteilen auf der Grundlage automatisierter Stereoauswertung

Allein im baugeschichtlich-archäologischen Forschungsprojekt zur Stadtentwicklung Baalbeks wurden mit dem vorgestellten Verfahren mehr als 40 Bauteile und Architekturfragmente in

Anwendungsbeispiel	Bauteildokumentation / maßliche Rekonstruktion
Aufnahmesystem / Optik	Fuji FinePix S2 Pro (12 MPixel), 14 mm u. 35 mm Festbrennweite
Aufnahmeabstand / Basis	1 m / 30 cm bis 6 m / 60 cm
Orientierungsverfahren	relative Orientierung, Co-Registrierung über Objektgeometrie
Objektreferenz	Stereobasis, Maßstab
Anzahl Stereomodelle	mind. 2
Ergebnisse	Punktwolke, Einzelmaße, Regelgeometrien, 3D-Modelle, Orthobilder

Tabelle 7.2: Zusammenfassung allgemeine Bauteildokumentation

über 200 Stereomodellen erfasst und dokumentiert. Für die photogrammetrischen Aufnahmen stand dabei nur eine digitale Spiegelreflexkamera zur Verfügung, die jeweils vom linken auf den rechten Standpunkt umgesetzt werden musste. Einerseits ergibt sich dadurch eine längere Aufnahmezeit vor Ort, zum anderen besteht beim Umsetzen der Kamera die Gefahr, dass die Position und Ausrichtung der Stereobasis verändert wird und damit die Basislänge als alleinige Maßstabsreferenz nicht verwendet werden kann. Daher mussten zusätzliche Maßstabsinformationen in den Objektraum eingebracht werden, die eine nachträgliche Skalierung der Stereomodelle erlaubten. Ein effizientes, anwenderfreundliches und zuverlässiges System sollte daher aus zwei möglichst identischen Kameras bestehen, deren Basisabstand anhand eines Referenzkörpers vor der Messkampagne kalibriert wird und für den Zeitraum der Aufnahmen stabil ist. Durch eine synchrone Auslösung beider Kameras entfällt die Notwendigkeit einer zum Teil sehr umständlichen Fixierung des Systems auf einem möglichst stabilen Stativ, vielmehr genügt hier ein leichtes und flexibles Fotostativ.

7.4 Ansichtsdarstellungen freigelegter Grabungsprofile und Mauerreste

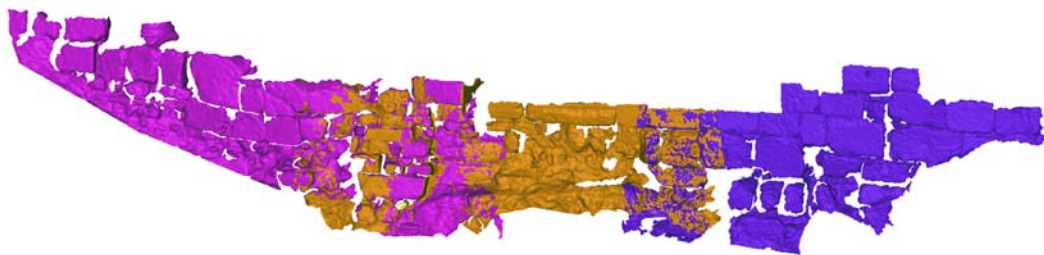
Trotz der Möglichkeiten dreidimensionaler Aufnahmeverfahren bleibt die zweidimensionale Ansichts- und Schnittdarstellung in Archäologie und Bauforschung nach wie vor Standard für die Dokumentation von Objekten. Insbesondere für die flächenhafte Auswertung von Wand- und Fassadenansichten werden hierfür regelmäßig photogrammetrische Verfahren eingesetzt, da durch die fotografische Abbildung in sehr kurzer Zeit große Objektbereiche mit einer sehr hohen Informationsdichte erfasst werden können. Für die Dokumentation *ebener* Objekte hat sich die projektive Bildentzerrung (Kap. 3.3.2) bewährt, da sie mit geringem Aufwand auch durch die Anwender selbst durchgeführt werden kann.

Tiefengegliederte, nicht-ebene Objekte lassen sich durch automatisierte Stereoauswertung schnell und unkompliziert erfassen, der gerätetechnische Aufwand beschränkt sich auf das in Kapitel 5.2 vorgestellte Aufnahmesystem unter Verwendung kalibrierter Digitalkameras. Ein typisches Anwendungsbeispiel für die Nutzung der automatischen Stereoauswertung in der baugeschichtlich-archäologischen Forschung ist die in Abbildung 7.6 gezeigte grabungsbegleitende Dokumentation freigelegter Mauerreste. In der Regel ergeben sich dabei keine ebenen Objektoberflächen, so dass eine projektive Entzerrung zu perspektiven Lageversätzen und damit zu Fehlern bei der zeichnerischen Umsetzung führt. Eine direkte Vermessung mit Handaufmaß oder Tachymetrie liefert zwar die gewünschte orthogonale Ansichtsprojektion, ist jedoch aufgrund der meist hohen Befunddichte sehr aufwendig und erfordert eine lange Aufnahmezeit vor Ort. Für die Erfassung nicht-ebener Objekte wird zunehmend das

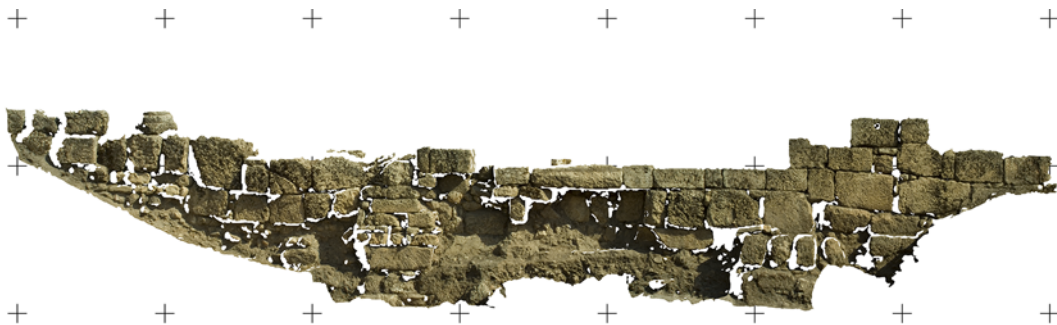
terrestrische Laserscanning eingesetzt, allerdings fehlen hier zunächst hochauflösende Farbinformationen, sie müssen zumeist über zusätzliche photogrammetrische Aufnahmen beschafft werden. Zudem ist der Aufwand für den Aufbau und Transport bei häufigen Standpunktwechseln deutlich größer als bei dem verwendeten Stereoaufnahmesystem.



(a) Ausgangsbilder der drei Stereomodelle (jeweils eine Aufnahme)



(b) 3D-Modell aus der automatischen Stereoauswertung von drei Einzelmodellen



(c) Orthobildplan für eine Auswertung im Maßstab 1:25 (Abstand der Gitterkreuze 2 m)

Abbildung 7.6: Generierung orthogonaler Ansichtsdarstellungen für nicht-ebene Objekte

Mit dem vorgestellten Aufnahmesystem konnten im Forschungsprojekt Baalbek über 40 Orthobildpläne im Maßstab 1:50 erstellt werden. Insgesamt wurden hierfür mehr als 70 Stereomodelle mit unterschiedlicher Systemkonfiguration aufgenommen (siehe Tab. 7.3). Da die Orthobildpläne in übergeordnete Schnitt- und Ansichtssysteme eingebunden werden sollten, erfolgte nach der automatisierten relativen Modellorientierung eine absolute Orientierung im jeweiligen Ansichtssystem über tachymetrisch bestimmte Passpunkte. Die relevanten Bildbereiche wurden anschließend durch punktbasierte Oberflächenmessung automatisiert ausgewertet und aus den 3D-Punktwolken wurden durch 3D-Vermaschung digitale Oberflächenmodelle erzeugt. Zusammen mit den Bildinformationen der Stereoaufnahmen wurden daraus maßstäbliche Orthobilder im Koordinatensystem der jeweiligen Ansicht generiert. Durch diesen einheitlichen Koordinatenbezug können mehrere Orthobilder eines Ansichtssystems sofort zu einem Orthobildplan zusammenmontiert werden. U.a. konnte auf diese Weise ein

aus 12 Einzelansichten zusammengesetzter Orthobildplan für einen ca. 40 m Schnitt durch ein Grabungsareal erstellt werden.

Anwendungsbeispiel	Ansichtsdokumentation Mauerreste
Aufnahmesystem / Optik	Fuji FinePix S2 Pro (12 MPixel), 14 mm, 24 mm, 35 mm Festbrennweite
Aufnahmeabstand / Basis	1 m / 30 cm bis 6 m / 60 cm
Orientierungsverfahren	relative + absolute Orientierung
Objektreferenz	Passpunkte
Anzahl Stereomodelle	je nach Objektgröße 1 - 10
Ergebnisse	Orthobilder

Tabelle 7.3: Zusammenfassung Dokumentation Mauerreste

7.5 Erstellung von Orthobildplänen gegliederter Fassaden

Die Erstellung orthogonaler Ansichten von stark gegliederten oder figürlichen Objekten ist zumeist mit einem hohen zeitlichen und gerätetechnischen Aufwand verbunden. Zunehmend kommt für die Erfassung entsprechender Objekte eine Kombination aus scannenden Verfahren (Laserscanning, Streifenlichtscanning) und Photogrammetrie zum Einsatz. Aus den gescannten Oberflächengeometrien zusammen mit den hochauflösenden Bildinformationen lassen sich geometrisch korrekte orthogonale Ansichtsprojektionen generieren, die als Grundlage für eine zeichnerische Dokumentation dienen oder, ausbelichtet auf Fotopapier, als maßstäblicher Fotoplan archiviert und weiterverwendet werden können. Gegenüber der einfachen Bildentzerrung (Kap. 3.3.2) haben Orthobilder den großen Vorteil, dass unabhängig von der Tiefengliederung des Objektes für alle Objektbereiche eine lagerichtige orthogonale Abbildung erfolgt.

Im Rahmen des Forschungsprojektes zur bau- und kunstgeschichtlichen Untersuchung der Kathedrale in Santiago de Compostela konnte ein Orthobildplan der „Puerta de las Platerias“ am Südportal der Kirche ausschließlich über automatisierte Stereoauswertung erstellt werden (Abb. 7.7). Die Eingangsfassade am südlichen Querhaus hat eine Breite von ca. 11 m und ist insgesamt ca. 16 m hoch, die photogrammetrische Erfassung erstreckt sich auf den Bereich oberhalb der Eingangstüren ab einer Höhe von knapp 4 m. Insgesamt wurden über 30 Digitalaufnahmen mit einer Fuji FinePix S2 Pro mit 24 mm bzw. 35 mm Festbrennweitenobjektiv erstellt. Die Fassade wurde hierfür vertikal in drei Bereiche aufgeteilt (Türbögen inkl. Tympana, Figurenplatten oberhalb der Türbögen, Fassade Obergeschoss), die mit jeweils 9 Aufnahmen im Abstand von ca. 1 m aufgenommen wurden. Zusätzlich entstanden jeweils zwei Aufnahmen der Tympanonbereiche mit einem Basisabstand von 60 cm. Alle Aufnahmen wurden von einem (nur) ca. 2 m hohen Gerüst aufgenommen, so dass zum Teil sehr große Kameraneigungen (bis 45 gon) nötig waren, um auch die oberen Fassadenbereiche zu erfassen.

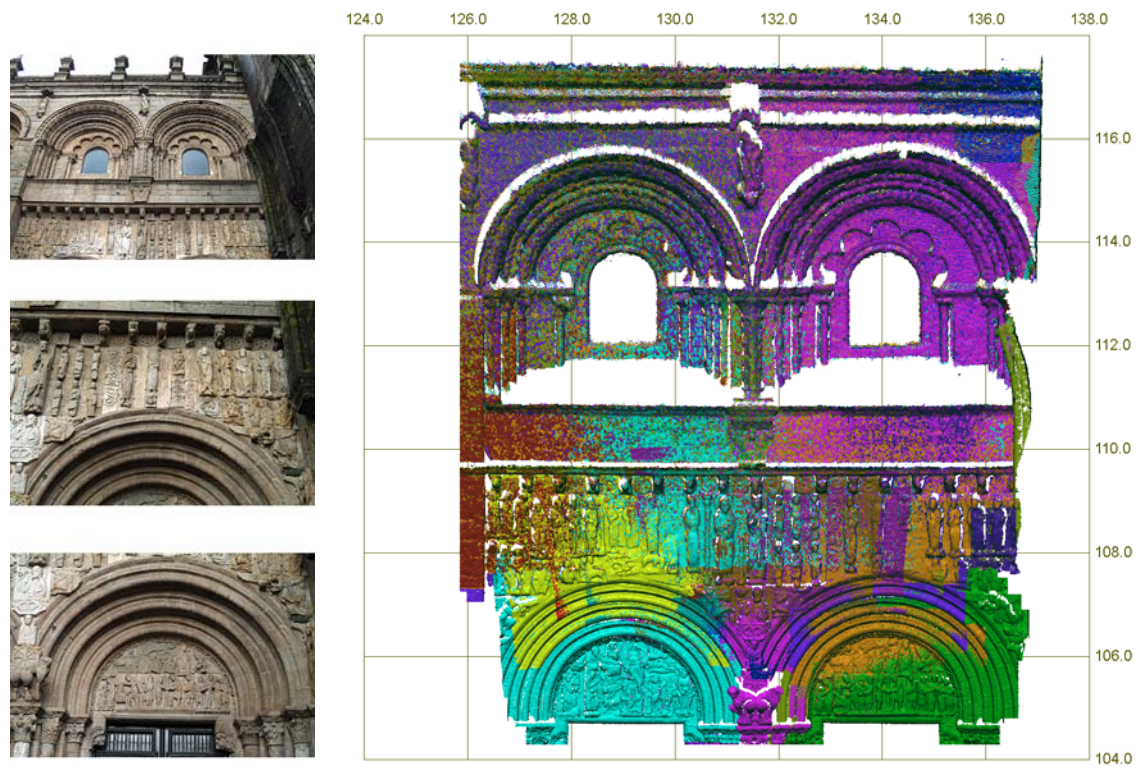
Die Orientierung der Bilder erfolgte im Zuge einer Bündelausgleichung basierend auf tachymetrisch bestimmten Passpunkten und natürlichen Verknüpfungspunkten mit simultaner Bestimmung von Kamerakonstante und Bildhauptpunkt für die verwendeten Brennweiten der beiden Objektive. Aus den orientierten Einzelbildern wurden 29 Stereomodelle gebildet, die durch automatische Oberflächenmessung einzeln ausgewertet wurden, wobei insgesamt

mehr als 13 Mio. Objektpunkte bestimmt wurden. Aus den Punktwolken der einzelnen Modelle wurden Oberflächenmodelle für die Berechnung von Orthobildern erstellt. Durch die gemeinsame Orientierung aller Bilder in einem einheitlichen Objektkoordinatensystem ergibt sich für jedes Orthobild automatisch der richtige Lagebezug im Ansichtssystem, die einzelnen Orthobilder lassen sich darüber zu einem Orthobildplan zusammenfügen.

Das Beispiel zeigt, dass mit Hilfe automatisierter Stereoauswertung durchaus auch größere Objekte mit vergleichsweise geringem (gerätetechnischen) Aufwand erfasst werden können. Gleichzeitig werden aber auch die Grenzen des Verfahrens deutlich. So kommt es im oberen Bereich der Fassade aufgrund der geringeren Auflösung zu Glättungseffekten bei der flächenbasierten Bildzuordnung (siehe Kap. 4.3). Zusammen mit der starken Kameraneigung ergeben sich dadurch auch sichtbare perspektive Lageversätze insbesondere an Kanten und in Bereichen mit größerer Tiefenbewegung. Um entsprechende Objekte mit der geforderten Auflösung und Genauigkeit vollständig zu erfassen, müssen sehr viele Aufnahmen erstellt werden, was den Aufwand für die Bildorientierung und -auswertung deutlich erhöht.

Anwendungsbeispiel	Orthobildplan „Puerta de las Platerias“
Aufnahmesystem / Optik	Fuji FinePix S2 Pro (12 MPixel), 24 mm und 35 mm Festbrennweite
Aufnahmeabstand / Basis	6 m / 60 cm, 9 m / 2 m, 12 m / 2 m
Orientierungsverfahren	Bündelblockausgleichung
Objektreferenz	Passpunkte
Anzahl Stereomodelle	29
Ergebnisse	Orthobildplan

Tabelle 7.4: Zusammenfassung Erstellung Orthobildplan „Puerta de las Platerias“



(a) Ausgangsbilder (Auswahl)

(b) Punktwolken der einzelnen Stereomodelle (Einheit: m)



(c) Orthobildplan unterer Bereich (Abstand der Gitterkreuze 2 m, Originalmaßstab 1:50)

Abbildung 7.7: Erstellung eines Orthobildplans der „Puerta de las Platerias“ in Santiago de Compostela durch automatische Stereoauswertung

8 Zusammenfassung - Kritik - Ausblick

Die photogrammetrische Objekterfassung in Archäologie, Bauforschung und Denkmalpflege hat trotz der Entwicklung (aktiv) scannender Verfahren (Laserscanning, Streifenlichtscanning) nicht an Bedeutung verloren. Dies zeigen zum einen zahlreiche Beiträge auf aktuellen Fachtagungen (siehe u.a. GONZALEZ-AGUILERA u. a., 2015; GRUSSENMEYER, 2013), zum anderen kann dies auch durch eigene Erfahrungen bei der Mitarbeit in ganz unterschiedlichen Projekten, sowohl in der Forschung als auch in der praktischen Bauaufnahme, bestätigt werden. Die gezeigten Beispiele in der vorliegenden Arbeit geben einen kleinen Überblick über die Spannbreite der eingesetzten Verfahren. Die bildhafte Dokumentation verbunden mit der hohen Informationsdichte einer fotografischen Abbildung sind entscheidende Eigenschaften bei der Auswahl geeigneter Aufnahmeverfahren in diesen Anwendungsgebieten.

Weitere Gründe für den regelmäßigen Einsatz photogrammetrischer Verfahren liegen in der hohen Flexibilität und der Skalierbarkeit der Aufnahmekonfiguration und der verwendeten Aufnahmetechnik. In der Regel kommen für die Aufnahmen digitale Spiegelreflexkameras mit hoher Auflösung und guter Optik zum Einsatz. Dabei kann mit *einem* Aufnahmesystem vom archäologischen Kleinfund, über einzelne Architekturbauteile bis hin zum vollständigen Bauwerk ein sehr breites Spektrum an Objekten mit sehr unterschiedlichen Konfigurationen erfasst werden (z.B. Einbildaufnahmen für Entzerrungen, Stereo- oder Mehrbildaufnahmen für Orthobilder oder 3D-Modelle). Auch die für die Auswertung verwendeten Verfahren sind weitgehend unabhängig von der Objektgröße, so dass auch die benötigte Software für den gesamten Anwendungsbereich genutzt werden kann. Dem Anwender steht damit eine sehr flexible und nicht zuletzt auch kostengünstige Technologie für die Objekterfassung zur Verfügung.

Unterstützt wird diese Entwicklung zum einen durch immer leistungsfähigere digitale Aufnahmesysteme, welche die analogen Kameras mittlerweile fast vollständig verdrängt haben und hinsichtlich der Auflösung inzwischen an Mittelformatbilder heranreichen¹. Zum anderen ermöglicht die Integration angepasster Verfahren der digitalen Bildverarbeitung und Bildanalyse eine zunehmende Automatisierung des Auswertevorgangs und erschließt dem Anwender neue bzw. erweiterte Verfahren der photogrammetrischen Objektauswertung.

Neben der einfachen projektiven Entzerrung ebener Objekte rücken damit vermehrt auch photogrammetrische 3D-Verfahren in den Fokus der Anwender. In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass insbesondere einfache, auf der klassischen Stereophotogrammetrie basierende Aufnahmekonfigurationen sehr gut für die anwendungsbezogene Erfassung räumlich gegliederter Objekte geeignet sind. Eine wesentliche Erleichterung des Aufnahme- und Auswerteprozesses ergibt sich dabei durch die Verwendung einer Basisschiene mit definierten Abständen für die Stereoaufnahmen. Dem Anwender wird hierdurch die Aufnahme-

¹ Aktuelle digitale Spiegelreflexkameras haben eine Sensorauflösung von ca. 24 MPixel (März 2015). Ein mit 2.400 dpi digitalisiertes Mittelformatbild (5,5 cm x 5,5 cm) liefert eine Auflösung von ca. 27 MPixel

konfiguration mechanisch fest vorgegeben, es erfolgt lediglich eine objektabhängige Anpassung des Basisabstandes.

Neben der vereinfachten Aufnahme vor Ort eignen sich Stereo- bzw. erweiterte Vier-Kamera-Modelle in besonderer Weise für eine automatisierte Orientierung und Auswertung. Die große Ähnlichkeit (genähert) paralleler Aufnahmen erleichtert die automatisierte Suche nach homologen Punkten in den Bildern. Für die Suche nach markanten Punkten haben sich dabei die aus der Luftbildphotogrammetrie bekannten Verfahren als geeignet erwiesen und konnten in modifizierter Form verwendet werden. Die speziell für konvergente Bildverbände entwickelten Feature-Detektoren haben in den Untersuchungen keine Vorteile gegenüber den klassischen Verfahren bei der Punktsuche in parallelen Zwei- oder Vier-Kamera-Konfigurationen gezeigt.

Aus diesem Grund wird auch für die gemeinsame Orientierung mehrerer Stereomodelle ein zweistufiges Vorgehen empfohlen: zunächst werden alle beteiligten Modelle getrennt voneinander relativ orientiert und anhand geeigneter Objektinformationen bzw. über den bekannten Basisabstand der Kameras in den Objektraum skaliert. Die Transformation der Einzelmodelle in ein einheitliches Objektsystem erfolgt anschließend über automatisiert gemessene Objektgeometrien in den Modellen. Als ein sehr robustes und anschauliches Verfahren hat sich dabei der ICP-Algorithmus erwiesen, bei dem die Transformationsparameter zwischen den einzelnen Modellen auf der Grundlage überlappender Punktwolken mit einer sehr hohen Genauigkeit und Redundanz bestimmt werden. Die rein photogrammetrische Orientierung eines Mehrbildverbandes wurde aufgrund der hohen Anzahl der dabei zu berücksichtigenden Beobachtungen und der Komplexität eines solchen Ausgleichungsproblems für die hier betrachteten Anwendungsgebiete nicht weiter untersucht.

Für die Bestimmung von Oberflächengeometrien wurden, neben der interaktiven Auswertung durch einen Stereoauswerter, die punkt- bzw. flächenbasierte Messung sowie die konturbasierte Auswertung als automatisierte Verfahren näher untersucht. Bei der flächenbasierten Auswertung werden, ausgehend von einem bzw. mehreren Startpunkten, automatisch weitere Punktkorrespondenzen in einem Stereo- bzw. Vier-Kamera-Modell durch Expansion der Punktzuordnung auf benachbarte Bildbereiche gesucht. Die Objektoberfläche wird durch eine sehr große Anzahl automatisch bestimmter Punkte mit einer sehr hohen Punktdichte erfasst. Das Ergebnis entspricht den Punktwolken aktiv messender Scanverfahren, wobei die Punkte zusätzlich mit den hochauflösenden Farbinformationen der Ausgangsbilder eingefärbt werden können. Der Zuordnungsprozess, und damit das Ergebnis der automatischen Oberflächenmessung, hängt vor allem von der Textur und Beschaffenheit der Objektoberfläche sowie von den Beleuchtungsverhältnissen zum Aufnahmezeitpunkt ab. Insbesondere für nicht glänzende, steinsichtige oder verputzte Oberflächen konnten mit den eingesetzten Zuordnungsverfahren sehr zuverlässig und vollständig Objektpunkte bestimmt werden. Verfahrensbedingt scheitert die flächenbasierte Punktzuordnung jedoch an texturarmen bzw. stark glänzenden Oberflächen. Einzelne Punkte können hier ggf. durch manuelle Stereoauswertung bestimmt werden, für eine flächenhafte Erfassung entsprechender Objekte sind hier jedoch andere Messverfahren einzusetzen.

Im Gegensatz zur flächenbasierten Auswertung kann die konturbasierte Auswertung auf der Grundlage automatisch extrahierter Kanten nur in Ausnahmefällen für die formgetreue Bestimmung von 3D-Objektgeometrien in den hier diskutierten Anwendungsgebieten eingesetzt werden. Der Grund hierfür liegt in den z.T. stark unterschiedlichen Ergebnissen der Kantenextraktion in benachbarten Aufnahmen, die ihre Ursachen vor allem in Beleuchtungsunter-

schieden sowie in der unterschiedlichen perspektiven Abbildung von Objektkanten innerhalb eines Stereo- bzw. Vier-Kamera-Modells haben. Obwohl Kanten in einem *einzelnen* Bild (scheinbar) mit Subpixel-Genauigkeit bestimmt werden können, führen die Unterschiede in den beteiligten Kantenbildern zu kaum brauchbaren Ergebnissen bei der Zuordnung und Generierung von 3D-Konturen im Objektraum. Somit eignen sich lediglich ungestörte und sehr exakt definierte Objektkanten, wie sie u.a. im industriellen Umfeld häufig zu finden sind, für einen automatischen Auswerteprozess. Die an vielen Objektkanten historischer Objekte auftretenden Schäden, Deformationen und Definitionsungenauigkeiten lassen eine automatische Erfassung mit den hier untersuchten Verfahren der Kantenextraktion und -zuordnung in der Regel jedoch scheitern.

Mit Hilfe der vorgestellten Verfahren zur automatisierten Bildorientierung und Auswertung von Stereo- bzw. Vier-Kamera-Modellen lässt sich ein anwendungsorientiertes System zur photogrammetrischen Dokumentation für die Bereiche Archäologie, Bauforschung, Denkmalpflege und Restaurierung konzipieren. Neben der klassischen Einbildauswertung und Bildmontage projektiver Entzerrungen ermöglicht ein solches System dem Anwender u.a. die Generierung von 3D-Modellen als Grundlage für die Erstellung maßstäblicher Orthobildpläne auch für nicht-ebene Objekte sowie für weiterführende Analyse- oder Rekonstruktionsprozesse. Durch die Nutzung möglichst einfacher und anschaulicher Verfahren zur Bildorientierung und -auswertung soll es auch den Anwendern möglich sein, den photogrammetrischen Auswerteprozess, von der Kamerakalibrierung über die Aufnahmen vor Ort bis hin zur Bildorientierung und -messung, weitgehend nachzuvollziehen.

Die aktuellen Entwicklungen von Verfahren und Software zur vollautomatischen Generierung texturierter 3D-Oberflächenmodelle aus beliebig orientierten Aufnahmen, die unter dem Begriff *Structur-from-Motion* einem größeren Anwenderkreis bekannt sind, zeigen das Potenzial, das in der Kombination photogrammetrischer Verfahren mit Verfahren der digitalen Bildverarbeitung und Bildanalyse liegt. Auch ohne photogrammetrische Vorkenntnisse gelingt es hier in kürzester Zeit, aus Amateuraufnahmen sehr anschauliche 3D-Modelle zu erzeugen. Der gesamte Prozess der Bildorientierung, Kamerakalibrierung und Oberflächenmessung läuft dabei weitgehend automatisiert ab. Als Ergebnis werden dem Anwender zumeist nur die fertigen Punktwolken oder 3D-Modelle präsentiert, detaillierte Aussagen zu den erreichten Genauigkeiten, insbesondere beim Orientierungsprozess, sind in der Regel nicht möglich.

Die Komplexität der mehrstufigen, analytisch-digitalen Auswerteverfahren stellt den größten Kritikpunkt bei der automatisierten photogrammetrischen Objektdokumentation für die Anwender dar. Während bei direkten Messverfahren, wie der Tachymetrie oder auch dem Laserscanning, die erreichte Objektgenauigkeit unmittelbar angegeben und kontrolliert werden kann und lediglich von der gewählten Messkonfiguration und dem Messgerät abhängt, bauen die Ergebnisse einer photogrammetrischen 3D-Auswertung auf verschiedenen Annahmen, Parametern und Modellen auf, die für den Anwender oft nicht nachvollziehbar sind. Hierzu zählen u.a.:

- mathematische Modellierung des Aufnahmesystems
- stochastisches Modell und Parametrisierung der ausgleichenden Bildorientierung
- Parameter der automatischen Punktmessung und -zuordnung
- Interpretation der erreichten Genauigkeiten bei der Bestimmung von Objektgeometrien

- Zusammenführung mehrerer Objektmodelle, Punktwolkenbereinigung und Generierung von Oberflächenmodellen

Die automatisierte photogrammetrische Auswertung bleibt damit weitgehend eine „Black Box“, der die Anwender „blind“ vertrauen müssen. Die Ergebnisse dieses Prozesses sind daher stets kritisch zu hinterfragen und zu kontrollieren.

Die vorgestellten Verfahren zur automatisierten Orientierung und Auswertung von Zwei- und Vier-Kamera-Modellen können künftig, entsprechend dem Vorgehen bei SfM-Verfahren, auf Mehrbildverbände erweitert werden. Die Erfassung sollte dabei über paarweise aufgenommene Stereomodelle erfolgen, um eine unabhängige, interaktive Stereoauswertung zu ermöglichen. Die automatisiert erfassten Oberflächen können damit um manuell gemessene Objektgeometrie, zum Beispiel im Bereich von Fehlstellen oder an Objektkanten, ergänzt werden. Die Untersuchungen in (REMONDINO und KERSTEN, 2012) zeigen, dass in aktuellen SfM-Programmen häufig nur vereinfachte Parametersätze für die innere Orientierung verwendet werden, die zu Ungenauigkeiten und Instabilitäten bei der Bildorientierung und -auswertung führen können. Um mit den verwendeten Amateurkameras zuverlässige und genaue Ergebnisse generieren zu können, müssen daher flexible und anwendungsbezogene Verfahren zur Kamerakalibrierung zur Verfügung stehen. Damit Anwender die Ergebnisse des photogrammetrischen Auswerteprozesses beurteilen können, sind anschauliche Darstellungen zu den erreichten Genauigkeiten bei der Bildorientierung und Objektpunktbestimmung zu integrieren. Neben der Erstellung von 3D-Modellen muss es zudem möglich sein, aus den automatisch bestimmten 3D-Geometrien die für die Dokumentation und weiterführende Objektanalyse notwendigen 2D-Abbildungen zu generieren.

Die automatische Stereoauswertung basiert vor allem auf der flächenhaften Zuordnung ähnlicher Bildbereiche. Während dieses Vorgehen für weitgehend stetige und gut texturierte Objektoberflächen schnell und zuverlässig 3D-Oberflächenpunkte liefert, fehlen nach wie vor robuste Lösungen zur automatisierten Bestimmung natürlicher Objektkanten. Hier sind weitere Entwicklungsarbeiten nötig, die die flächenhafte 3D-Auswertung um kantenbasierte Verfahren ergänzen. Zu untersuchen wäre dabei u.a., inwieweit globale, kantenerhaltende Zuordnungsstrategien, wie das in Kapitel 5.4.3 vorgestellte Semi-Globale Matching, auch für natürliche Objektgeometrien im Nahbereich eingesetzt werden können.

Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über die Möglichkeiten der automatisierten Bildauswertung im Nahbereich mit einem speziellen Fokus auf die Anwendung in Archäologie, Bauforschung, Denkmalpflege und Restaurierung. Berücksichtigung haben dabei einerseits die speziellen Anforderungen an die Ergebnisse einer photogrammetrischen Auswertung in diesen Bereichen gefunden. Zum anderen müssen die Besonderheiten hinsichtlich der zu erfassenden Objekte und der Bedingungen bei der photogrammetrischen Aufnahme vor Ort beachtet werden. Die Untersuchungen sowie die zahlreichen praktischen Beispiele haben gezeigt, dass automatisierte Verfahren für die Dokumentation und Auswertung hier eine immer größere Rolle spielen und den Anwendern damit ein weiteres, sehr flexibles Werkzeug zur 3D-Objekterfassung zur Verfügung steht.

Anhang A

Software

Für die vorliegenden Untersuchungen wurde eine Software-Umgebung erstellt, die zum Großteil auf selbst entwickelten Programmen und Bibliotheken basiert, darüber hinaus aber auch auf vorhandene Schnittstellen und Bibliotheken zurückgreift (Abbildung A.1). Die Software-Umgebung lässt sich in drei Schichten gliedern:

- Algorithmik und Schnittstellen,
- die eigentlichen Anwendungen
- sowie die grafische Benutzerschnittstelle und die Ausgabe.

Kern der Software aus algorithmischer Sicht bildet die selbst entwickelte **imglib**-Bibliothek, die zahlreiche Verfahren zur Bildverarbeitung und Bildanalyse, photogrammetrische Funktionen sowie verschiedene Dateischnittstellen beinhaltet.

Darauf aufbauend sind mit **bikome2D** und **stereo3D** zwei Anwendungen entstanden, die einen einfachen Zugriff auf die in der **imglib** enthaltenen Funktionen ermöglichen. Während **bikome2D** für monoskopische Messung von Bildkoordinaten sowie die Anwendung und Visualisierung von Bildverarbeitungsverfahren genutzt wird, erlaubt **stereo3D** die stereoskopische Messung in Bildpaaren sowie die Nutzung automatisierter Zuordnungsverfahren für die Zwei- bzw. Mehrbildauswertung.

Die einzelnen Komponenten der Software-Architektur sollen im folgenden kurz vorgestellt werden.

A.1 Algorithmik und Dateischnittstellen

imglib Die Bibliothek stellt die zentrale Komponente in der hier vorgestellten Software-Umgebung dar und beinhaltet eine Vielzahl von Funktionen für die Bearbeitung und photogrammetrische Auswertung digitaler Bilddaten. Sie lässt sich in die folgenden Funktionsgruppen bzw. Module gliedern:

- *Schnittstellen* für die Ein- und Ausgabe von Bild- und 3D-Punktdaten sowie für den Datenaustausch mit Rollei CDW und Software der fokus GmbH,
- *photogrammetrische Funktionen* zur Berechnung von Rotationsmatrizen, Kollinearitätsgleichungen, ausgleichender Vorwärtsschnitt, relative Orientierung, Berechnung Epipolarlinie, Parameterberechnung für Entzerrung, Affintransformation und Verzeichnungs-korrektur,

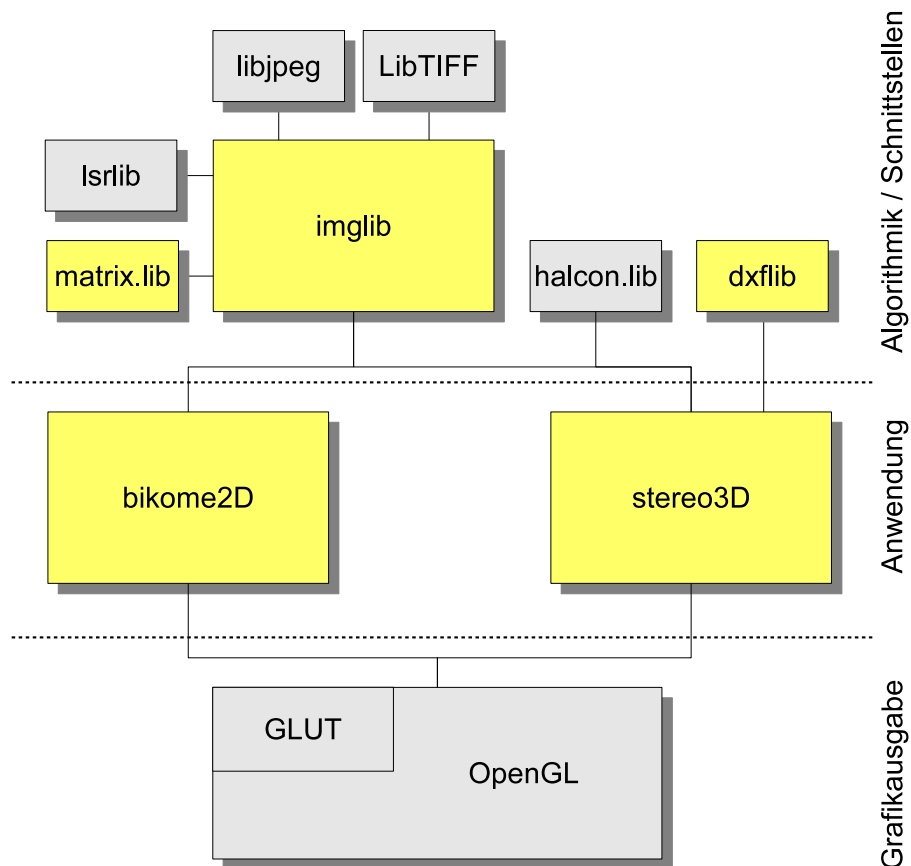


Abbildung A.1: Softwarekomponenten (gelb: eigene Entwicklungen)

- *geometrische Transformation von Bilddaten*, darunter Affintransformation, projektive Entzerrung, differentielle Entzerrung (Orthobildentzerrung), Skalierung, Rotation, Bildausschnitt, Verzeichnungskorrektur,
- *Funktionen zur Bildanalyse*, wie Histogramm-Anpassung, digitale Filter, morphologische Operationen (u.a. Dilatation, Erosion, Closing) sowie
- *Werkzeuge für die (automatisierte) Bildmessung*, mit Schwerpunktoperator, Ringoperator, Canny-Operator, Interest-Operatoren (Förstner, SUSAN, FAST), Kreuzkorrelation, LS-Matching.

Darüber hinaus stellt die Bibliothek spezielle Datenstrukturen und Datentypen für die verschiedenen Funktionsgruppen bereit.

halcon.lib Die Bibliothek ist Bestandteil des umfangreichen kommerziellen Softwarepaketes *HALCON* (<http://www.halcon.com>) zur Bildanalyse und zum maschinellen Sehen. Neben der Einbindung der Funktionen in eigene Programme über verschiedene Programmierschnittstellen (darunter C, C++) steht mit *HDevelop* auch eine Entwicklungsumgebung zur Verfügung, die, unabhängig von einer Programmiersprache, einen direkten Zugriff auf die Funktionen und Operatoren von *HALCON* ermöglicht. Hierüber lassen sich sehr schnell

einfache Anwendungen zum Test einzelner Algorithmen realisieren. Die Nutzung der *HALCON*-Bibliotheken bzw. der Entwicklungsumgebung *HDevelop* setzt jedoch eine gültige Lizenz sowie einen entsprechenden Hardware-Schutz voraus.

HALCON bzw. die Funktionen der *halcon.lib* wurden vor allem dazu verwendet, verschiedene Operatoren und Algorithmen der Bildverarbeitung und Bildanalyse im Vorfeld zu testen und eigene Implementierungen zu verifizieren.

matrix.lib Viele Algorithmen aus den Bereichen Ausgleichsrechnung, Photogrammetrie und Bildverarbeitung lassen sich mit Hilfe der Matrizenrechnung sehr anschaulich darstellen. Die Bereitstellung von Matrizenoperatoren in einer eigenen Bibliothek ermöglicht eine effiziente und fehlerunanfällige Implementierung solcher Algorithmen und deren einheitliche Nutzung in verschiedenen Anwendungen.

dxflib Neben den in der *imglib* bereits enthaltenen Schnittstellen zum Import und Export von 3D-Punktdateien (u.a. VRML, PLY) können über diese Bibliothek komplexe 3D-Vektordaten entsprechend dem DXF-Standard (Release 12) ausgetauscht und verwaltet werden. So können z.B. die durch Stereoauswertung erstellten Geometrien exportiert und in einem CAD-Programm weiter verarbeitet werden. Umgekehrt können DXF-Zeichnungen als Grundlage für eine Fortführung der Stereoauswertung importiert und in der Stereoansicht eingeblendet werden (Superimposition).

libjpeg / LibTIFF Die Bibliotheken stellen Funktionen zum einfachen Zugriff (Lesen und Schreiben) auf digitale Bilddaten in den standardisierten Formaten JPG und TIFF zur Verfügung und werden über die *imglib* eingebunden. Beide Bibliotheken sind im Quelltext verfügbar und können damit in eigenen Software-Projekten ohne Einschränkungen genutzt werden (<http://www.ijg.org/>, <http://www.remotesensing.org/libtiff/>).

lsrlib Über die in der *imglib* implementierten photogrammetrischen Funktionen hinaus stellt diese Bibliothek weitere Funktionen u.a. zur Berechnung von räumlichem Rückwärtsschnitt, Bündelblockausgleichung und Kamerakalibrierung zur Verfügung. Dabei werden unterschiedliche geometrische Modelle, darunter Panoramakamera, zentralperspektive Kamera, verschiedene Fisheye-Modelle, berücksichtigt. Die Software entstand im Rahmen einer Dissertation (SCHNEIDER, 2009) und wird für die Orientierung von Vier-Kamera-Modellen verwendet.

A.2 Anwendungen und Benutzerschnittstellen

Basierend auf der *imglib*-Bibliothek wurden zwei Anwendungsprogramme mit einfacher grafischer Benutzerschnittstelle entwickelt. Mit *bikome2D* werden Funktionen zur monoskopischen Bildmessung sowie zur Bildorientierung und Bildanalyse bereitgestellt, während *stereo3D* die stereoskopische Auswertung von Bildpaaren bzw. von Drei- oder Vier-Kamera-Modellen ermöglicht. Im Vordergrund der Entwicklungen stand dabei die schnelle und unkomplizierte Bereitstellung der in der *imglib* implementierten Funktionen sowie die visuelle Begutachtung der Bildverarbeitungs- und Messfunktionen am Bildschirm und nicht die Entwicklung einer

anwenderfreundlichen Software mit ergonomischer Benutzeroberfläche. Beide Anwendungen greifen auf OpenGL als Grafikschnittstelle für die Visualisierung von Raster- und Vektordaten zurück, eine einfache grafische Benutzerschnittstelle wird darauf aufbauend über GLUT realisiert.

A.2.1 bikome2D

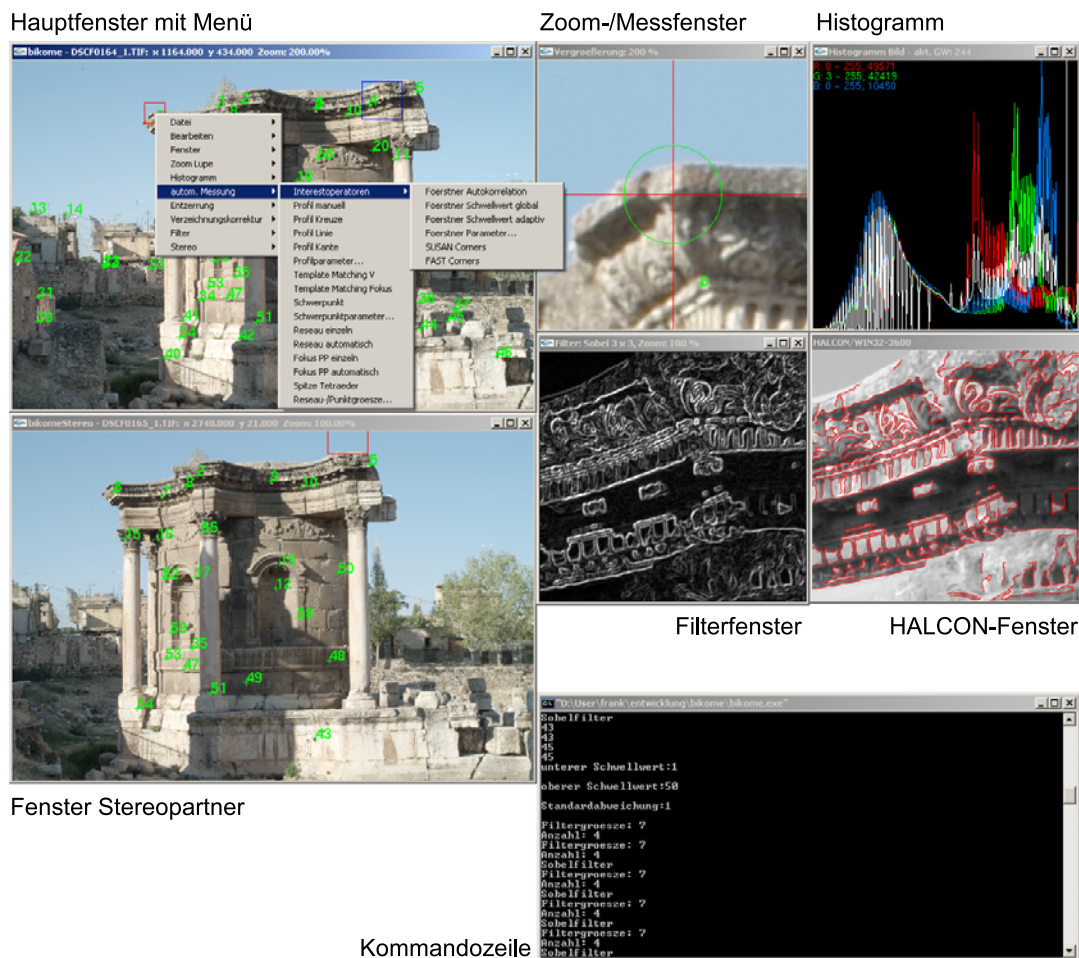


Abbildung A.2: bikome2D

Zunächst wird mit dem Programm ein digitales Bild geladen und im Hauptfenster vollständig angezeigt. Über die rechte Maustaste ist in diesem Fenster das Hauptmenü zur Programminteraktion erreichbar, das u.a. folgende Unterpunkte enthält:

- Datei: Bild öffnen/speichern, Bildkoordinaten laden/speichern, Programm beenden
- Bearbeiten: Punktnummer ändern/löschen, alle Punkte löschen, autom. Nummerierung an/aus
- Fenster an/aus: Mess-, Filter-, Histogramm-, Entzerrung-, Kamera-Fenster
- Histogramm: Anzeige für Haupt-, Filter-, Entzerrung-, Kamera-Fenster

- autom. Messung: Interest-Operatoren, Profil-Messung, Template-Matching, Schwerpunkt-Operator, Messung Réseaukreuze und Segmentmarken
- Entzerrung: über Rechteck, über Passpunkte
- Verzeichnungskorrektur: Linien laden/speichern, Plumblin-Kalibrierung
- Filter: Glättungsfilter, Kantenfilter, eigene Filter, Filterbild speichern
- Stereo: Stereopartner laden, Kamera- und Affinparameter laden, Interest-Operatoren, Messung homologer Punkte, Parameter Bildzuordnung, relative Orientierung (ggf. mit RANSAC), absolute Orientierung, Orientierung Vier-Kamera-Konfiguration

Zusätzlich wird ein quadratisches Zoom- bzw. Messfenster geöffnet, dessen Bildinhalt abhängig von der Mausposition und dem eingestellten Zoomfaktor im Hauptfenster kontinuierlich angepasst und mitgeführt wird. Mit dem im Messfenster angezeigten Fadenkreuz lassen sich Bildpunkte interaktiv anmessen, eine Feineinstellung der Messposition erfolgt über die Pfeiltasten. Das Messfenster zeigt automatisch den Bildinhalt des Programmfensters an, in dem sich der Mauszeiger befindet, für jedes Fenster (Haupt-, Stereo-, Filterfenster) kann dabei ein separater Zoomfaktor eingestellt werden.

Standardmäßig wird zudem ein Filterfenster geöffnet, in dem die Ergebnisse der gewählten Filteroperation aus der *imglib*-Bibliothek angezeigt werden. Innerhalb dieses Fensters steht über die rechte Maustaste das Untermenü zum Aufruf der verschiedenen Filterfunktionen zur Verfügung. Der Inhalt des Filterfensters kann durch Klick mit der linken Maustaste im Hauptfenster geändert werden. Die aktuell gewählte Filterfunktion und die ggf. dafür eingegebenen Parameter werden dann auf den neuen Bildausschnitt angewandt.

Sofern eine Lizenz für die *HALCON*-Bibliotheken vorhanden ist, wird automatisch ein weiteres Fenster geöffnet, das die Ergebnisse ausgewählter *HALCON*-Funktionen wiedergibt. Die Funktionen sind dann über einen zusätzlichen Unterpunkt im Filtermenü erreichbar.

Über das Menü im Hauptfenster kann zusätzlich ein weiteres Bild geladen werden, das analog zum Hauptfenster in einem weiteren Übersichtsfenster vollständig angezeigt wird. Im Hauptmenü stehen dann zusätzliche Funktionen zur automatisierten Messung und Punktzuordnung im Stereopartner sowie zur relativen und absoluten Orientierung des Stereobildpaares zur Verfügung. Für die Orientierung einer Vier-Kamera-Konfiguration (siehe Kap. 5.2.2) können zusätzlich die Bildkoordinaten und Kameraparameter des zweiten Stereomodells geladen werden. Die Orientierung erfolgt über die *lsr*lib-Bibliothek.

Über eine Kameraschnittstelle lässt sich eine Fuji FinePix S2 Pro vom Programm aus bedienen und auslösen. Das erfasste Bild wird in einem separaten Kamerafenster angezeigt. Das Ergebnisbild einer projektiven Entzerrung wird ebenfalls in einem separaten Fenster wiedergegeben.

Die Eingabe von Parametern sowie die Ausgabe von Rückmeldungen bestimmter Funktionen erfolgt über ein Kommandozeilen-Fenster (DOS-Shell). Die Funktionalität des Programms soll anhand von drei Anwendungsbeispielen kurz vorgestellt werden.

A.2.1.1 Automatische Orientierung eines Stereobildpaares

Zusätzlich zum bereits geladenen (linken) Bild wird über den Menüpunkt *Stereo* der zugehörige Stereopartner (rechtes Bild) geladen und in einem separaten Fenster geöffnet. Im Stereo-Menü findet sich nach dem Öffnen der Unterpunkt *Interest-Operatoren*, über den für beide Bilder markante Punkte z.B. mit Hilfe des Förstner-Operators (siehe Kap. 4.2.1) extrahiert werden. Die Interest-Punkte werden in beiden Bildern angezeigt, das Ergebnis kann durch Änderung der Parameter des Operators angepasst werden. Anschließend erfolgt über den Unterpunkt *Stereozuordnung* eine automatische Zuordnung homologer Interest-Punkte entsprechend Kapitel 5.3.4. Nach dem Laden der Kameraparameter kann die relative Orientierung berechnet werden, Ausreißer bei der Punktzuordnung werden dabei mittels RANSAC automatisch eliminiert. Als Ergebnis werden neben einer Protokolldatei die Orientierungsdaten zu jedem Bild sowie eine stereo3D-Projektdatei erstellt. Das orientierte Modell kann damit sofort im Programm stereo3D geöffnet und ausgewertet werden.

A.2.1.2 Interaktive Messung homologer Punkte

Neben der vollautomatischen Bestimmung homologer Punkte über Interest-Operatoren können zugehörige Punkte in zwei Bildern auch interaktiv durch den Anwender gemessen werden. Hierzu werden im Ausgangsbild mit der linken Maustaste Bildpunkte manuell festgelegt. Alternativ können auch vorhandene Bildkoordinaten geladen werden. Im Bildpartner wird anschließend die zugehörige Bildposition für die Suche nach einem homologen Punkt näherungsweise mit der Maus vorgegeben. Dies kann durch einfachen Klick erfolgen, wobei ein Suchfenster vorgegebener Größe (z.B. 50 x 50 Pixel) um die Näherungsposition untersucht wird. Alternativ wird der Suchbereich durch Aufziehen eines rechteckigen Bereiches im Stereofenster bei gedrückter Maustaste vom Anwender festgelegt. Im Suchbereich wird nun die Position der besten Übereinstimmung mit dem vorgegebenen Referenzpunkt mit Hilfe der normierten Kreuzkorrelation bestimmt. Die subpixelgenaue Zuordnung erfolgt durch Paraboloid- oder Kleinste-Quadrate-Anpassung.

A.2.1.3 Verzeichnungskorrektur über Plumblin-Kalibrierung

Die automatisierte Messung von Bildgeraden für die Plumblin-Kalibrierung erfolgt über profilgesteuerte Kantenextraktion (Kap. 4.4.3). Hierfür wird ein geeignetes Bild mit entsprechenden Kanten- bzw. Linienstrukturen (siehe Abb. 5.1) geöffnet. Über den Menüpunkt *automatische Messung* wird, je nach Typ der Objektgeraden, die Profilmessung für *Kanten* oder für *Linien* gewählt. Im Bild werden Anfangs- und Endpunkt der Objektgeraden näherungsweise angemessen. Die subpixelgenaue Bestimmung weiterer Kanten- bzw. Linienpunkte auf der Objektgeraden (siehe Kap. 4.4.3) erfolgt automatisch mit dem voreingestellten Intervall für die Profilmessung. Die gemessenen Kanten/Linien können über den Menüpunkt *Verzeichnungskorrektur* gespeichert und in weiteren Bildern des Objektes als zusätzliche Beobachtungen hinzugeladen werden. Über den Menüpunkt *Plumblin berechnen* werden die Verzeichnungsparameter entsprechend Kapitel 5.1.1 bestimmt und es wird ein korrigiertes (entzeichnetes) Bild berechnet. Zur Kontrolle der Berechnung werden die mit den Verzeichnungsparametern korrigierten Linien zusätzlich zu den gemessenen Linien im Hauptfenster dargestellt. Alternativ zur Bildentzeichnung auf der Basis gemessener Geradenstrukturen

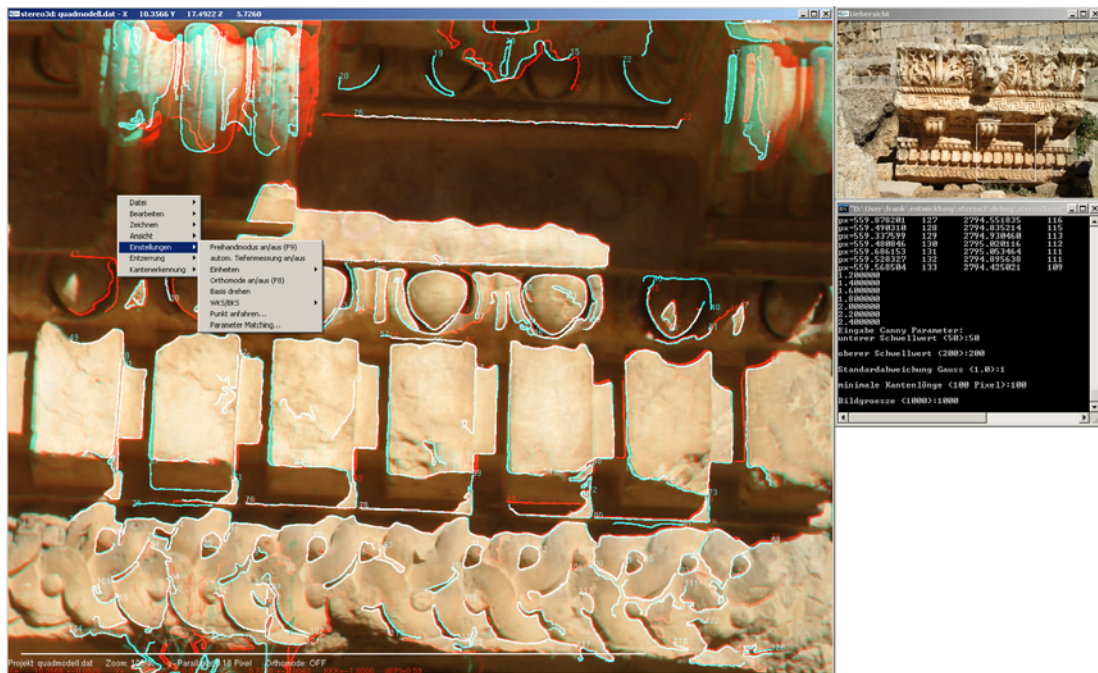


Abbildung A.3: Programmoberfläche stereo3D

Das Programm **stereo3D** dient der interaktiven und automatisierten Auswertung von Stereobildpaaren und erweiterten Vier-Kamera-Konfigurationen. Die Orientierung der Bilder erfolgt im Vorfeld über das Programm **bikome2D** (relative u. absolute Orientierung, Orientierung Vier-Kamera-Konfiguration) bzw. im Rahmen einer Bündelblockausgleichung. Für den Import orientierter Stereo- bzw. Vier-Kamera-Modelle stehen neben eigenen Dateiformaten Schnittstellen zu Orientierungsdaten aus Rollei CDW sowie metigo 3D (fokus GmbH Leipzig) zur Verfügung.

Nach dem Öffnen eines Stereomodells werden die Bilder im Hauptfenster standardmäßig in Anaglyphendarstellung stereoskopisch angezeigt. Bei geeigneter Grafikkarte (OpenGL Quad-Buffer Unterstützung) kann die Bildtrennung auch über eine Shutter-Brille erfolgen. Zusätzlich wird ein Übersichtsfenster angezeigt, in dem der Ansichtsbereich für das Hauptfenster ausgewählt werden kann. Die Eingabe und Ausgaben von Programmparametern und Rückgabewerten erfolgt über ein Kommandozeilen-Fenster (DOS-Shell).

Mit der rechten Maustaste kann im Hauptfenster ein Menü zur Programmsteuerung mit folgenden Unterpunkten aufgerufen werden:

- Datei: Projekt öffnen, Import (DXF, VRML, XYZ), Export (DXF, VRML, Orientierungsdaten, Anaglyphenbild), Programm beenden
- Bearbeiten: DOM löschen, Ausreißer finden/löschen/aufheben, absolute Orientierung

- Zeichnen: Einzelpunkt, 3D-Polylinie
- Ansicht: Stereoanzeige (Rot-Grün/Blau/Cyan), Vergrößerung (Prozent/Maßstab), Messmarke schwarz/weiß, Raster-/Vektordaten an/aus, Epipolarlinie an/aus
- Einstellungen: Freihandmodus an/aus, Schrittweite (mm/cm/dm/m), Basis drehen, Definition Benutzerkoordinatensystem, Parameter Matching
- Entzerrung: Festlegung Auswertebereich (linkes/rechtes Bild), Passpunkte messen, Entzerrung linkes/rechtes Bild
- Kantenerkennung: Parameter Canny-Operator, Kanten verbinden, Kanten zuordnen

Für eine effektive Auswertung sind darüber hinaus zahlreiche Funktionen auch direkt über Tastatureingaben steuerbar.

Der stereoskopische Messvorgang wird über eine Messmarke realisiert, deren Koordinaten im Modell- bzw. Objektsystem über die Maus oder die Tastatur in der vorgegebenen Schrittweite (mm/cm/dm/m) verändert werden können. Für die Bewegung der Messmarke im Stereomodell wurden zwei verschiedene Modi implementiert:

- feste Messmarke: die Messmarke befindet sich im Zentrum des Auswertefensters, während sich die Position und die Parallaxe der beiden Bilder abhängig von den Koordinaten der Messmarke ändern. Die Bewegung im Stereomodell erfolgt über die Tastatur mit der eingestellten Schrittweite. Mit den Cursor-Tasten wird die Position parallel zur X-Z-Ebene festgelegt, die Einstellung der Tiefe erfolgt über Tasten für Bild auf/ab.
- freie Messmarke: die Position der Messmarke im Auswertefenster wird durch die Mausbewegung parallel zur X-Z-Ebene (terrestrischer Fall) des Objektkoordinatensystems verändert, die Einstellung der Tiefe erfolgt über das Mausrad. Parallel dazu kann die Position der Messmarke weiterhin auch über die Tastatur verändert werden.

Die Messung von Objektpunkten erfolgt in beiden Messmodi durch automatische Bildzuordnung (Kap. 4.3). Das manuelle Einstellen der Tiefe durch (virtuelles) Aufsetzen der Messmarke auf der Objektoberfläche wird damit überflüssig und das Ergebnis der interaktiven Stereoauswertung ist nicht mehr abhängig von der individuellen stereoskopischen Wahrnehmung des Anwenders.

Um die Funktionalität der implementierten Software zu verdeutlichen, sollen drei typische Auswertemethoden kurz erläutert werden.

A.2.2.1 Interaktive Auswertung

Eine einfache interaktive Auswertung von Stereomodellen ist über die implementierten Zeichenfunktionalitäten für 3D-Einzelpunkte und 3D-Polylinien möglich. Zweckmäßigerweise erfolgt die Auswertung bei freier Messmarke, d.h. Objektpunkte im Auswertefenster können direkt mit der Maus angefahren und gemessen werden. Die Tiefenmessung, d.h. die Zuordnung homologer Punkte, erfolgt automatisch durch subpixelgenaue Bildzuordnung. Alternativ kann die Tiefe aber auch manuell über das Mausrad eingestellt werden. Das Ergebnis der interaktiven Auswertung kann als DXF-Datei exportiert und in einem CAD-Programm weiterbearbeitet werden.

A.2.2.2 Punktbasierte Oberflächenmessung

Die automatische punktbasierte Oberflächenmessung erfolgt durch objektbezogene Auswertung entsprechend Kapitel 5.4.1. Ausgehend von der eingestellten Position der Messmarke wird interaktiv ein Auswertebereich am Objekt sowie eine Schrittweite für die automatische Punktmessung vorgegeben. Für jeden gemessenen Punkt wird neben den Objektkoordinaten zusätzlich die Standardabweichung aus dem ausgleichenden Vorwärtsschnitt sowie der zugehörige Farb- bzw. Grauwert aus einem der beiden Bilder gespeichert. Als Ergebnis erhält man eine texturierte Punktwolke, die als VRML-Datei exportiert und mit entsprechender Software weiterverarbeitet werden kann.

A.2.2.3 Kantenbasierte Auswertung

Eine vereinfachte Auswertung basierend auf automatisch extrahierten Kanten wurde prototypisch implementiert. Zunächst werden für einen ausgewählten Bereich im Stereomodell automatisch Kanten mit Hilfe des Canny-Operators in allen Bildern subpixelgenau extrahiert (siehe Kap. 4.4). Anschließend erfolgt durch interaktive Auswahl einzelner Kanten eine Zuordnung über diskrete Kantenpunkte entsprechend Kapitel 4.5.2. Als Ergebnis erhält man 3D-Kantenpolygone, die als VRML- oder DXF-Datei exportiert und als Grundlage für eine weiterführende Auswertung (z.B. 3D-Modellierung, 2D-Ansichtsdarstellungen) verwendet werden können.

A.2.3 OpenGL / GLUT

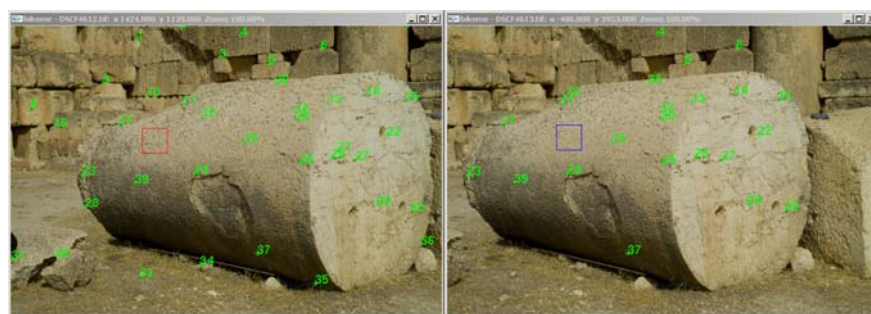
Als Grafikschnittstelle für die gemeinsame Anzeige von Raster- und Vektordaten kommt in beiden Anwendungen OpenGL zusammen mit dem OpenGL Utility Toolkit GLUT zum Einsatz (<https://www.opengl.org/>). OpenGL stellt vor allem Transformationen zur Abbildung der virtuellen 3D-Welt (R^3) auf den zweidimensionalen Computermonitor (R^2) zur Verfügung, unterstützt aber auch die Abbildung von Bilddaten und 2D-Geometrien.

Mit Hilfe des OpenGL Utility Toolkit GLUT werden OpenGL-Programmen systemspezifische Funktionen für den Zugriff auf Hardware (Maus, Tastatur) und Grafikfenster über eine einheitliche Programmierschnittstelle zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus lassen sich mit GLUT einfache Auswahlmenüs in ein Grafikfenster integrieren (siehe Abb. A.2). Damit lassen sich sehr schnell und effizient prototypische Anwendungen ohne Zugriff auf komplexe betriebssystem-spezifische Benutzerschnittstellen entwickeln.

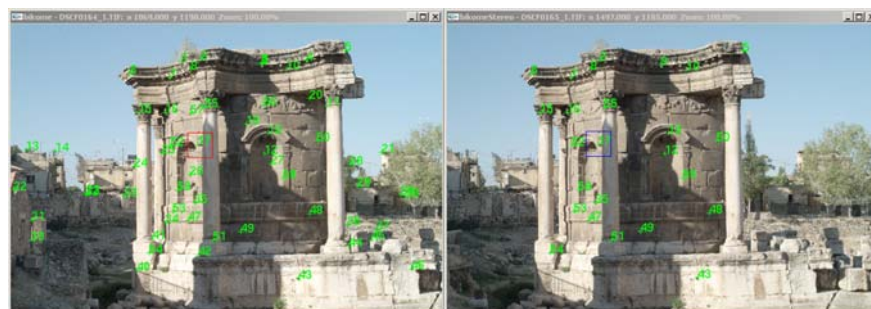
Anhang B

Farbtafeln der Stereomodelle

Die Bezeichnung der Bildpaare (a)-(k) entspricht der Nummerierung in Tabelle 4.3.



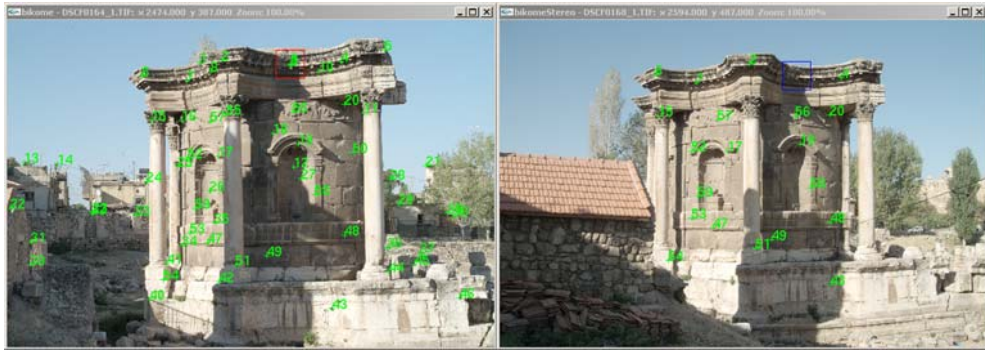
(a) Säulentrommel Baalbek, Normalfall, digital/digital



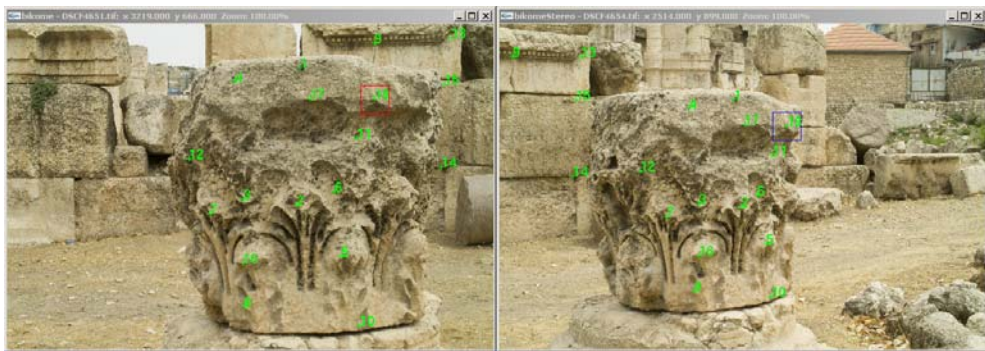
(b) Venustempel Baalbek, Normalfall, digital/digital



(c) Westportal Dom St. Petri, Bautzen, Normalfall, analog/analog



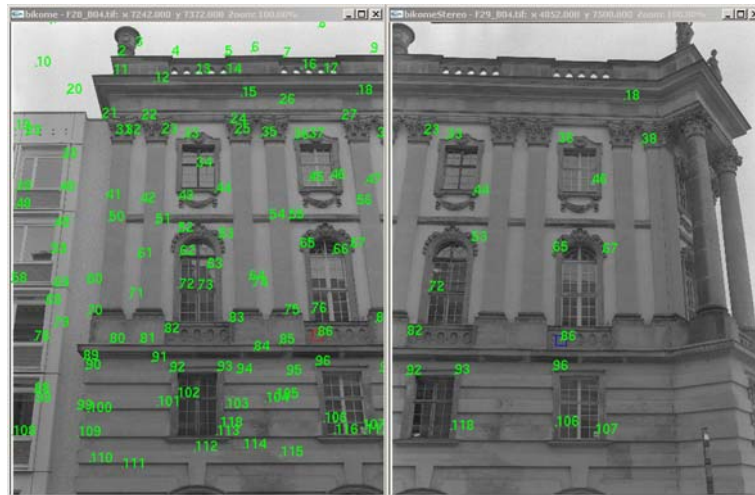
(d) Venustempel Baalbek, Konvergenzfall, digital/digital



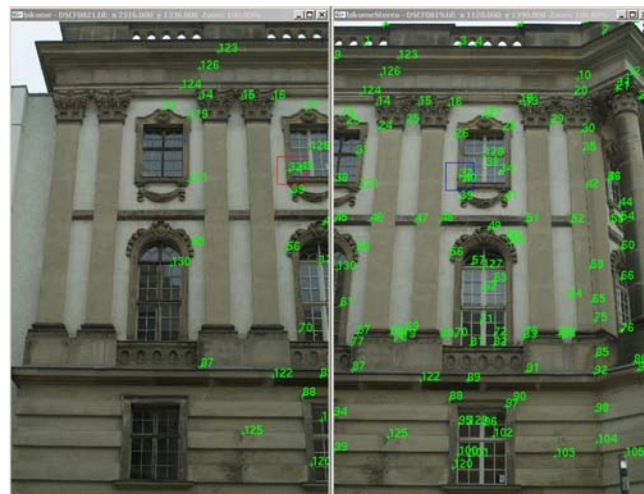
(e) Kapitell Baalbek, Konvergenzfall, digital/digital



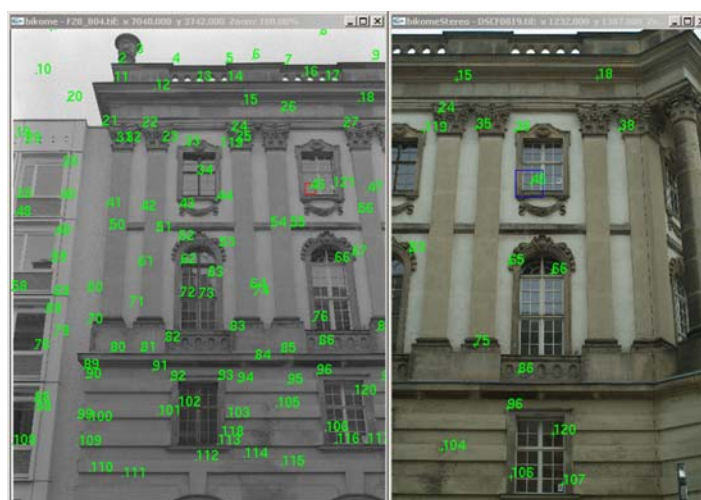
(f) Architrav Baalbek, Konvergenzfall, digital/digital



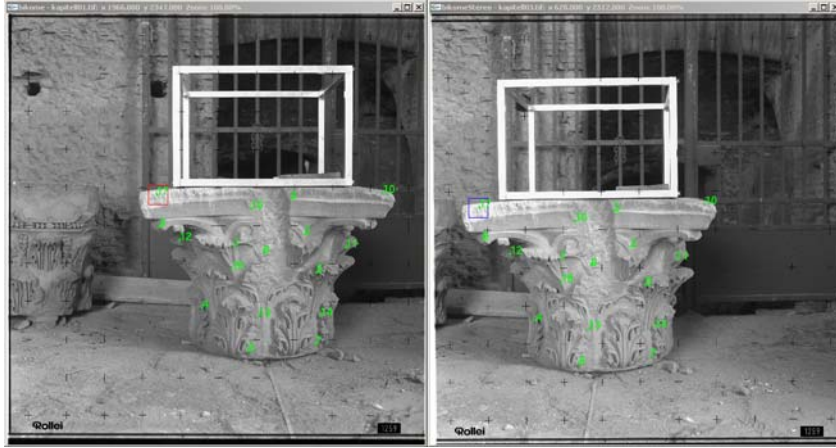
(g) Alte Bibliothek Berlin („Kommode“), parallele Aufnahmen, geneigt, analog/analog



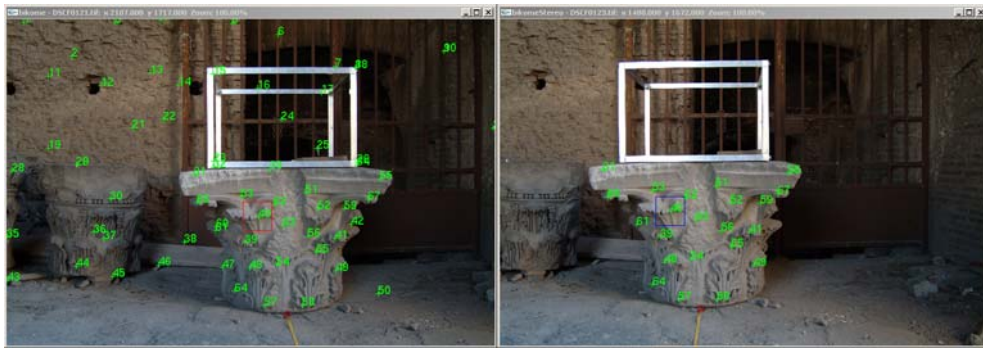
(h) Alte Bibliothek Berlin („Kommode“), parallele Aufnahmen, geneigt, digital/digital



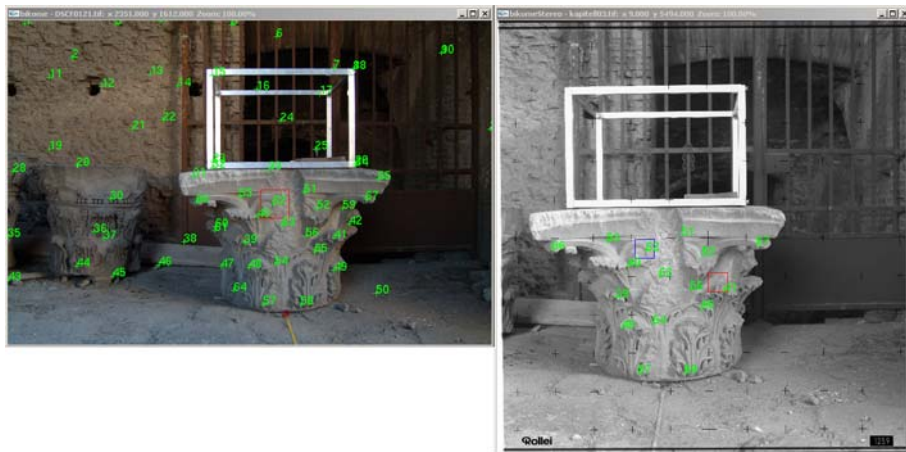
(i) Alte Bibliothek Berlin („Kommode“), parallele Aufnahmen, geneigt, analog/digital



(j) Kapitell Palatin, Normalfall, analog/analog



(k) Kapitell Palatin, Normalfall, digital/digital



(l) Kapitell Palatin, ~ parallele Aufnahmerichtung, , digital/analog

Abbildungsverzeichnis

Anwendungsgebiete und Anforderungen	5
2.1 Anordnung von Passinformationen am Objekt für die projektive Entzerrung .	9
(a) ungünstige Anordnung der Passinformationen in Form eines zu kleinen Rechtecks	9
(b) gleichmäßige Passpunktverteilung	9
2.2 Lageversatz bei der projektiven Entzerrung aufgrund der Tiefengliederung . .	12
(a) Schrägaufnahmen der Fassade	12
(b) Projektive Entzerrung	12
(c) Orthobild der Fassade	12
2.3 Lageversatz	13
 Photogrammetrische Verfahren	 15
3.1 Historische Messbilder, aufgenommen von Albrecht Meydenbauer zu Beginn des 20. Jh. (Messbildarchiv beim Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege, Bild-Nr. 1634-2 und 2083-28)	16
(a) Südfassade des Potsdamer Stadtschlusses	16
(b) Stadtansicht von Baalbek/Libanon	16
3.2 Konstruktionszeichnung zum Einschneideverfahren (aus GRIMM, 1977)	17
3.3 Stereokomparator, Modell E (links) und Autostereograph, Modell 1914 (aus PULFRICH, 1923)	18
3.4 Definition Bildkoordinatensystem (links) und Pixelkoordinatensystem	20
3.5 Definition eines Objektkoordinatensystems	21
3.6 Äußere Orientierung - terrestrischer Fall	23
3.7 Äußere Orientierung - Luftbildfall	25
3.8 Relative Orientierung für den Folgebildanschluss, terrestrischer Fall	29
3.9 Epipolarlinien einer Vier-Kamera-Konfiguration	30
3.10 Beispiele für Passpunktmarken	36
(a) Kreismarke mit integriertem Zielkreuz	36
(b) kreuzförmige Segmentmarke	36
(c) Segmentmarke mit Kodierung	36
(d) Kreismarke mit Kodierung	36
3.11 Objektgeometrien für die Einbildauswertung	37
(a) ebene Oberfläche	37
(b) zylindrische Objektgeometrie	37
(c) Freiformoberfläche	37
3.12 Maßstäblicher Bildplan aus mehreren Entzerrungen zusammen mit tachymetrisch bestimmten Geometrien (Kathedrale Santiago de Compostela, gemeinsame Darstellung von Haupt- und Emporengeschoss des südlichen Querschiffs)	40

3.13	Abwicklung auf der Grundlage einer gescannten Punktwolke	41
(a)	originale (grau) und abgewickelte Punktwolke	41
(b)	Ausgangsbild	41
(c)	Abwicklung	41
3.14	Repräsentationsformen für ein Digitales Oberflächenmodell (als Grundlage für das in Abb. 2.2(c) gezeigte Orthobild)	43
(a)	Interpoliertes Höhenraster über der Projektionsebene (2,5D)	43
(b)	Dreiecksvermaschung der gescannten 3D-Punkte	43
3.15	Doppelabbildungen im Orthobild aufgrund von Verdeckungen, rechts: durch Strahlverfolgung markierte, nicht sichtbare Bereiche	44
3.16	Digitales Oberflächenmodell aus Scannerdaten und Orthobildmosaik, zusammengesetzt aus 13 Einzelaufnahmen	45
3.17	Funktionsprinzip der autostereoskopischen Betrachtung mit Lentikularlinsen .	46
3.18	Ergebnis einer interaktiven Stereoauswertung mit einem digitalen Auswertesystem in Anaglyphendarstellung, links: vertikale Stereobasis, rechts: horizontale Stereobasis (photogrammetrische Aufnahme und Rohkartierung: fokus GmbH Leipzig)	47
3.19	Mehrbildauswertung einer gegliederten Fassade mit Rollei CDW (entstanden im Rahmen einer studentischen Übung an der BTU Cottbus)	48
3.20	Ausgearbeitete Fassadenpläne, basierend auf der Mehrbildauswertung aus Abbildung 3.19 (studentische Übung an der BTU Cottbus)	49
Ausgewählte Verfahren der digitalen Bildverarbeitung		51
4.1	Funktionsweise Faltung eines Bildes G mit der 3×3 Filtermaske H	52
4.2	Bildausschnitte aus der 3. Ebene einer Auflösungspyramide. Links: Berechnung über Gaußpyramide, Rechts: Auflösungsreduktion durch Unterabtastung . . .	54
4.3	Ergebnisse des Sobeloperators	55
(a)	horizontale Ableitung g_x	55
(b)	vertikale Ableitung g_y	55
(c)	Betrag des Gradienten	55
(d)	Richtung des Gradienten	55
4.4	Anwendung des Förstner-Operators	57
(a)	globale Schwellwertbildung, 2382 gefundene Punkte	57
(b)	adaptive Schwellwertbildung, 271 gefundene Punkte	57
4.5	Ergebnis der Merkmalsextraktion mit dem SIFT-Operator für einen Graustufenverlauf	59
4.6	Erfassung eines Kotflügels durch automatisierte Stereoauswertung mit Projektion eines Zufallsmusters (unten: 3D-Punktwolke aus unterschiedlichen Blickrichtungen)	62
4.7	Bildzuordnung an einer vertikalen Grauwertkante	63
4.8	Flächenbasierte Bildzuordnung über normierte Kreuzkorrelation	64
(a)	Mustermatrix f (oben) und Suchmatrix g	64
(b)	Verteilung des Korrelationskoeffizienten ρ_{fg}	64
4.9	Rotation und Stauchung (Skalierung in x-Richtung) des Referenzbildes	68
(a)	Referenzbild	68
(b)	$2,5^\circ$	68
(c)	5°	68

(d)	10°	68
(e)	20°	68
(f)	30°	68
(g)	5%	68
(h)	10%	68
(i)	25%	68
(j)	50%	68
4.10	Subpixelinterpolation Canny-Operator	73
4.11	Ergebnisse des Canny-Operators	74
(a)	pixelgenaue Kantenposition	74
(b)	subpixelgenaue Lokalisierung	74
4.12	Subpixel-Genauigkeit des Canny-Operators in Abhängigkeit der Gradientenrichtung φ ($t_{low} = 100, t_{high} = 200, \sigma = 1$)	75
4.13	Lage des Profils im Bild (links) sowie zugehörige Grauwertfunktion $g(x)$ und deren erste Ableitung $g'(x)$	76
4.14	Kreisförmiges Profil mit berechneten Nullstellen (links) sowie zugehörige Grauwertfunktion $g(x)$ und deren erste bzw. zweite Ableitung $g'(x)$ und $g''(x)$	77
(a)	Anwendung des Ring-Operators auf kreuzförmige Muster	77
(b)	Anwendung des Ring-Operators auf Segmentmarke	77
4.15	Kantenzuordnung in den Aufnahmen einer Vier-Kamera-Konfiguration	81
4.16	Unterschiede bei der Kantenextraktion mit Canny-Operator in den Aufnahmen einer Vier-Kamera-Konfiguration bei gleicher homogener Beleuchtung	82
4.17	Unterschiede bei der Kantenextraktion mit Canny-Operator bei unterschiedlicher Beleuchtung	83
4.18	Ergebnis aus flächenhafter und kantenbasierter Auswertung einer Vier-Kamera-Konfiguration	84
Automatisierte Stereoauswertung		85
5.1	Verzeichnungskorrektur über Plumblinie-Kalibrierung	88
(a)	verzeichnete Bilder mit automatisiert gemessenen Geraden	88
(b)	korrigierte Bilder	88
5.2	Aufnahmekonfiguration für eine Feldkalibrierung	89
5.3	Aufnahmen zur Feldkalibrierung einer Amateurkamera für zwei unterschiedliche Fokuseinstellungen	90
5.4	Kalibrierkörper für unterschiedliche Objektgrößen und Anwendungsgebiete	91
5.5	Vergleich der Kameraparameter aus verschiedenen Kalibrierungen	94
(a)	Bildhauptpunktlage mit $\sigma_{x_H}, \sigma_{y_H}$	94
(b)	Kamerakonstante mit σ_{c_K}	94
(c)	radial-symmetrische Verzeichnung	94
5.6	Unterschiedliche Realisierungen eines Stereomeßsystems mit digitalen Amateurkameras	96
(a)	Digitale Spiegelreflexkamera auf einer kalibrierten Basisschiene	96
(b)	Synchrone Bilderfassung mit zwei baugleichen Kameras	96
5.7	Objektgenauigkeit bei der Stereoauswertung in Abhängigkeit von Basis- und Aufnahmeabstand entsprechend Gleichung 2.3	97
5.8	Vier-Kamera-Konfiguration durch Verschiebung der Basis A um ΔH	98

5.9	Ergebnisse der Punktfestlegung über ein Raster (links) und über Interest-Operator (rechts)	104
(a)	Beispiel „korinthisches Kapitell“	104
(b)	Beispiel „romanisches Kapitell“	104
(c)	Beispiel „Säule“	104
5.10	Mögliche Bildkombinationen für die Punktzuordnung in einer Vier-Kamera-Konfiguration, rot/grün: verwendete Zuordnungspfade für die Untersuchungen	105
5.11	Aufnahmekonfiguration zur Erfassung eines Kraters mit insgesamt 16 Aufnahmen in 8 Stereomodellen	108
5.12	Registrierung von Punktwolken über identische Objektgeometrien	110
(a)	Einzelne Punktwolken aus drei konvergenten Stereomodellen	110
(b)	Über ICP referenzierte Punktwolken des Gesamtmodells	110
5.13	Abweichungen der Punktwolken bei der globalen Registrierung	110
5.14	Automatische Oberflächenmessung durch punktbasierte Auswertung (Anaglyphendarstellung)	112
(a)	bildbasierte Auswertung: flächenhafte Bestimmung der Objektgeometrie	112
(b)	objektbasierte Auswertung: Messung einzelner Profile	112
5.15	Automatische Oberflächenbestimmung über SfM, Stadtmauer Cottbus	117
(a)	Texturierte Punktwolke der automatisierten Bildauswertung mit Agisoft Photoscan (H. Burwitz, BTU Cottbus)	117
(b)	3D-Abweichungen zwischen Laserscanning und Photogrammetrie, $\sigma = 1,1\text{cm}$ (Th. Bauer, Trigonart GbR, Berlin)	117
Kombinierte Auswerteverfahren		119
6.1	Komponenten eines kombinierten Auswertesystems für die Anwendung in der Architektur- und Nahbereichsphotogrammetrie	126
Anwendungsbeispiele		127
7.1	Referenzrahmen zur Erfassung von Kleinfunden (Anaglyphendarstellung), grün: automatisch gemessene Profillinie	127
(a)	Aufnahme der Oberseite	127
(b)	Aufnahme der Unterseite	127
7.2	Ergebnisse der automatisierten Erfassung von Kleinfunden	128
(a)	3D-Modell der Oberseite	128
(b)	3D-Modell der Unterseite	128
(c)	Schnittprofil aus der Auswertung von Ober- und Unterseite (M 1:1) . .	128
7.3	Bauteilfragmente im sog. „Bustan el Khan“ in Baalbek/Libanon	130
7.4	Ergebnisse der automatisierten Bauteilerfassung	131
(a)	Registrierung der Einzelmodelle	131
(b)	Definition des Ansichtssystems	131
(c)	Orthogonale Ansicht, schattiert [m]	131
(d)	Orthobildplan [m]	131
7.5	Rekonstruktion von Bauteilen auf der Grundlage automatisierter Stereoauswertung	132

(a)	Bestimmung der Durchmesser antiker Kratere auf der Grundlage objekt-basierter Profilmessungen (links: autom. gemessene Profilpunkte in den Anaglyphenbildern)	132
(b)	Einpassung Zylinder/Kegel zur Rekonstruktion flächenhaft erfasster Säulenfragmente	132
7.6	Generierung orthogonaler Ansichtsdarstellungen für nicht-ebene Objekte . . .	134
(a)	Ausgangsbilder der drei Stereomodelle (jeweils eine Aufnahme)	134
(b)	3D-Modell aus der automatischen Stereoauswertung von drei Einzelmodellen	134
(c)	Orthobildplan für eine Auswertung im Maßstab 1:25 (Abstand der Gitterkreuze 2 m)	134
7.7	Erstellung eines Orthobildplans der „Puerta de las Platerias“ in Santiago de Compostela durch automatische Stereoauswertung	137
(a)	Ausgangsbilder (Auswahl)	137
(b)	Punktwolken der einzelnen Stereomodelle (Einheit: m)	137
(c)	Orthobildplan unterer Bereich (Abstand der Gitterkreuze 2 m, Originalmaßstab 1:50)	137
Software		143
A.1	Softwarekomponenten (gelb: eigene Entwicklungen)	144
A.2	bikome2D	146
A.3	Programmoberfläche stereo3D	149
Farbtafeln der Stereomodelle		153
B.1	Bildpaare zu Tabelle 4.3 in Kapitel 4.3.5	153
(a)	Säulentrommel Baalbek, Normalfall, digital/digital	153
(b)	Venustempel Baalbek, Normalfall, digital/digital	153
(c)	Westportal Dom St. Petri, Bautzen, Normalfall, analog/analog	153
(d)	Venustempel Baalbek, Konvergenzfall, digital/digital	154
(e)	Kapitell Baalbek, Konvergenzfall, digital/digital	154
(f)	Architrav Baalbek, Konvergenzfall, digital/digital	154
(g)	Alte Bibliothek Berlin („Kommode“), parallele Aufnahmen, geneigt, analog/analog	155
(h)	Alte Bibliothek Berlin („Kommode“), parallele Aufnahmen, geneigt, digital/digital	155
(i)	Alte Bibliothek Berlin („Kommode“), parallele Aufnahmen, geneigt, analog/digital	155
(j)	Kapitell Palatin, Normalfall, analog/analog	156
(k)	Kapitell Palatin, Normalfall, digital/digital	156
(l)	Kapitell Palatin, ~ parallele Aufnahmerichtung, , digital/analog	156

Literaturverzeichnis

- ACKERMANN, F.: High Precision Digital Image Correlation. In: *Photogrammetrische Woche 1983*, Universität Stuttgart, 1983 (Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie, Heft 9), S. 231–243
- AKCA, D.: *Least Squares 3D Surface Matching*, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Dissertation, 2007
- ALBERTZ, J.; KREILING, W.: *Photogrammetrisches Taschenbuch*. 4. Auflage. Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1989
- ALBERTZ, J.: Digitale Bildverarbeitung in der Nahphotogrammetrie - Neue Möglichkeiten und Aufgaben. In: *Bildmessung und Luftbildwesen* Band 54/2 (1986), S. 34–45
- ALBERTZ, J.; LIST, F. K.; SCHULTZ, G. (Hrsg.): *Wissenschaftlich-technische Jahrestagung der DGPF*. Berlin, 1985
- ALBERTZ, J.; WIEDEMANN, A. (Hrsg.): *Architekturphotogrammetrie gestern - heute - morgen*. Technische Universität Berlin, 1997
- ANNUSS, R.: *Automatische Paßpunktmessung in der Nahbereichsphotogrammetrie*, TU Berlin, Diplomarbeit, 1999. – unveröffentlicht
- BÄHR, H.-P.; VÖGTLE, T.: *Digitale Bildverarbeitung: Anwendungen in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung*. 2. Auflage. Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1991
- BAUER, J.; SÜNDERHAUF, N.; PROTZEL, P.: Comparing Several Implementations of two Recently Published Feature Detectors. In: *Proc. of the International Conference on Intelligent and Autonomous Systems, IAV, Toulouse, Frankreich*. Bd. 6/1, 2007, S. 143–148
- BAY, H.; TUYTELAARS, T.; GOOL, L. V.: SURF: Speeded Up Robust Features. In: *Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision, Graz, Austria, May 7-13, 2006*, S. 404–417
- BERNARDINI, F.; MITTLEMAN, J.; RUSHMEIER, H.; SILVA, C.; TAUBIN, G.: The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction. In: *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics* Vol. 5/4 (1999), S. 349–359
- BESL, P. J.; MCKAY, N. D.: A Method for Registration of 3-D Shapes. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* Vol. 14/2 (1992), S. 239–256
- BOOCHS, F.; GEHRHOFF, A.; NEIFER, M.: An object-oriented stereo system for 3D-measurements. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. XXXIII (2000), S. 566–573

- BOOCHS, F.; HEINZ, G.; HUXHAGEN, U.; MÜLLER, H.: Low-Cost Image Based System for Non-Technical Experts in Cultural Heritage Documentation and Analysis. In: *Proceedings of the XXI International CIPA Symposium, Athens, Greece, 2007*, S. 165–170
- BRÄUER-BURCHARDT, C.; VOSS, K.: Facade Reconstruction of Destroyed Buildings Using Historical Photographs. In: ALBERTZ, J. (Hrsg.): *Proceedings of the XVIII. International CIPA Symposium 2001, September 18 - 21, Potsdam*, IAPRS, Vol. XXXIV, Part 5/C7, 2001, S. 543–550
- BROWN, D. C.: Close-range camera calibration. In: *Photogrammetric Engineering* Vol. 37/8 (1971), S. 855–866
- BROWN, D.: A solution to the general problem of multi station analytical stereo-triangulation / Patrick Air Force Base, Florida. 1958. – Air Force Missile Test Center Report, Nr. 58-8
- BRUSCHKE, A.: Photogrammetrie zur Dokumentation und als Planungsgrundlage - Qualitätsbetrachtung. In: VENZMER, H. (Hrsg.): *Europäischer Sanierungskalender 2006*, Fraunhofer IRB Verlag, 2006, S. 108–123
- BÜHRER, T.; GRÜN, A.; ZHANG, L.; FRASER, C.; RÜTHER, H.: Photogrammetric Reconstruction and 3D Visualization of Bet Gorgis, a Rock-hewn Church in Ethiopia. In: ALBERTZ, J. (Hrsg.): *Proceedings of the XVIII. International CIPA Symposium 2001, September 18 - 21, Potsdam*, IAPRS, Vol. XXXIV, Part 5/C7, 2001, S. 338–344
- BURWITZ, H.; HENZE, F.; RIEDEL, A.: Alles 3D? - Über die Nutzung aktueller Aufnahmetechnik in der archäologischen Bauforschung. In: *Dokumentation und Innovation bei der Erfassung von Kulturgütern II, Vorträge der Fachtagung des Bundesverbands freiberuflicher Kulturwissenschaftler e.V. im März 2012* Bd. 5, URL <http://www.b-f-k.de/pub/index.php>, 2013. – Netzpublikation, Zugriffsdatum: 26.04.2015
- CANNY, J.: A computational approach to edge detection. In: *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* Vol. 8/6 (1986), S. 679–698
- CLARKE, T.: An analysis of the properties of targets uses in digital close range photogrammetric measurement. In: *Proceedings of Videometrics III. Boston*, SPIE Vol. 2350, 1994, S. 251–262
- DENDLER, M.: Photogrammetrische Dokumentationsmethoden - Stereoauswertung und digitale Bildpläne. In: ECKSTEIN, G. (Hrsg.): *Vom Messbild zur Bauanalyse - 25 Jahre Photogrammetrie im Landesdenkmalamt Baden-Württemberg*, Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, 2001, S. 85–94
- DEVERNAY, F.: A Non-Maxima Suppression Method for Edge Detection with Sub-Pixel Accuracy / Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique. November 1995. – Technical Report, Nr. 2724
- DUDA, R. O.; HART, P. E.: Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures. In: *Communications of the ACM* Vol. 15/1 (1972), S. 11–15
- ECKSTEIN, G. (Hrsg.): *Vom Messbild zur Bauanalyse - 25 Jahre Photogrammetrie im Landesdenkmalamt Baden-Württemberg*. Konrad Theiss Verlag, 2001

- ECKSTEIN, G.; LANDESDENKMALAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.): *Empfehlungen für Baudokumentationen, Arbeitsheft 7*. Konrad Theiss Verlag, Stuttgart, 2003
- ECKSTEIN, G.: Die Bestandsaufnahme - Beobachten, Messen, Analysieren, Dokumentieren. In: BRUSCHKE, A. (Hrsg.): *Bauaufnahme in der Denkmalpflege*, Fraunhofer IRB Verlag, 2005, S. 78–114
- FAUGERAS, O.: *Three-dimensional computer vision: a geometric viewpoint*. MIT Press, 1993
- FISCHLER, M. A.; BOLLES, R. C.: Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. In: *Communications of the ACM* Vol. 24/6 (1981), S. 381–395. – ISSN 0001-0782
- FISHER, R.; PERKINS, S.; WALKER, A.; WOLFART, E.: *The Hypermedia Image Processing Reference*. – URL <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/>. – Zugriffsdatum: 26.04.2015
- FÖRSTNER, W.: On the Geometric Precision of Digital Correlation. In: *Proceedings of the ISPRS Symposium 'Mathematical Models, Accuracy Aspects and Quality Control'* Bd. 24-III, 1982, S. 176–189
- FÖRSTNER, W.: A feature based correspondence algorithm for image matching. In: *Proceedings of the ISPRS Symposium 'From Analytical to Digital'* Bd. 26, 1986, S. 150–166
- FÖRSTNER, W.; GÜLCH, E.: A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distict Point, Corners and Centres of Circular Features. In: *Proceedings of the ISPRS Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken*, 1987, S. 281–305
- FRASER, C.: Network design. In: ATKINSON, K. (Hrsg.): *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, Whittles Publishing, UK, 1996, S. 256–281
- FRASER, C.; AL-AJLOUNI, S.: Zoom-Dependent Camera Calibration in Digital Close-Range Photogrammetry. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Vol. 72/9 (2006), S. 1017–1026
- FRYER, J. G.: Lens Distortion for Close Range Photogrammetry. In: *Proceedings of the Symposium Real-Time Photogrammetry - A New Challenge, June 16-19, Ottawa, Canada*, IAPRS, Vol. XXVI - Part A5, 1986
- FRYER, J. G.: Camera Calibration. In: ATKINSON, K. (Hrsg.): *Close-range Photogrammetry and Machine Vision*, Whittles Publishing, UK, 1996, S. 156–179
- GODDING, R.: Ein photogrammetrisches Verfahren zur Überprüfung und Kalibrierung digitaler Bildaufnahmesysteme. In: *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* Heft 2 (1993), S. 82–90
- GODDING, R.: Geometric Calibration and Orientation of Digital Imaging Systems / AICON 3D Systems GmbH, Germany. 1999. – Forschungsbericht
- GONZALEZ-AGUILERA, D.; REMONDINO, F.; BOEHM, J.; KERSTEN, T.; FUSE, T. (Hrsg.): *Proceedings of the 6th ISPRS International Workshop 3D-ARCH 2015 - 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, 25. - 27. Februar, Avila, Spanien*. URL <http://www.3d-arch.org/>, 2015. – Zugriffsdatum: 13.05.2015

- GRIMM, A.: *120 Jahre Photogrammetrie in Deutschland - Das Tagebuch von Albrecht Meydenbauer*. Abhandlungen und Berichte, 45. Jahrgang, Heft 2. Deutsches Museum München, 1977
- GRÜN, A.; AKCA, D.: Least Squares 3D Surface and Curve Matching. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. 59/3 (2005), S. 151–174
- GRÜN, A.: Adaptive least squares correlation: A powerful image matching technique. In: *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography* Vol. 14/3 (1985), S. 175–187
- GRÜN, A.: Von Meydenbauer zur Megaplast: Die Architekturphotogrammetrie im Spiegel der technischen Entwicklung. In: *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* Heft 2 (1994), S. 41–56
- GRUSSENMEYER, P. (Hrsg.): *Proceedings of the XXIV CIPA Symposium, Strasbourg, France, 2.-6. September 2013*. IAPRS, Vol. XL-5/W2, 2013
- HANKE, K.: Einsatz von CAD und Raytracing zur Visualisierung von Baudenkmalen. In: *Von Handaufmaß bis High Tech - Aufnahmeverfahren in der historischen Bauforschung, Interdisziplinäres Kolloquium vom 23.-26. Februar 2000*, Verlag Philipp von Zabern, Mainz, 2001, S. 83–87
- HARRIS, C.; STEPHENS, M.: A Combined Corner and Edge Detector. In: *Proceedings of The Fourth Alvey Vision Conference*, 1988, S. 147–151
- HARTLEY, R.; ZISSERMAN, A.: *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge university press, 2003
- HEIJDEN, F. van der: *Image Based Measurement Systems*. John Wiley & Sons, 1994
- HEINE, K.; RHEIDT, K.; HENZE, F.; RIEDEL, A. (Hrsg.): *Von Handaufmaß bis High Tech III - 3D in der Historischen Bauforschung*. Verlag Philipp von Zabern, Mainz, 2011
- HEMMLEB, M.: *Photogrammetrische Auswertung elektronenmikroskopischer Bilddaten*, TU Berlin, Fakultät VI - Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften, Dissertation, 2002
- HEMMLEB, M.; SIEDLER, G.; SACHER, G.: Digitale Bildentzerrungen und -abwicklungen für die Anwendung in Denkmalpflege, Bauforschung und Restaurierung. In: *Von Handaufmaß bis High Tech - Aufnahmeverfahren in der historischen Bauforschung, Interdisziplinäres Kolloquium, BTU Cottbus, 23.-26. Februar 2000*, Verlag Philipp von Zabern, Mainz, 2001, S. 74–82
- HEMMLEB, M.; SUTHAU, A.: Digital Mapping of Spherical Surfaces for the Investigation of Historical Globes. In: *Proceedings of the Third Turkish-German Joint Geodetic Days, Istanbul, June 1-4* Bd. 1, 1999, S. 387–394
- HEMMLEB, M.; WIEDEMANN, A.: Digital Rectification and Generation of Orthoimages in Architectural Photogrammetry. In: *Proceedings of the Int. CIPA Symposium '97, Photogrammetry in Architecture, Archaeology and Urban Conservation, Göteborg, Schweden, 1.-3. Okt.*, IAPRS, Vol. XXXII, Part 5C1B, 1997, S. 261–267
- HENZE, F.: *Koordinatenbestimmung in stereoskopischen Bildpaaren für die Anwendung in der Nahbereichsphotogrammetrie*. 2000. – Diplomarbeit, TU Berlin - unveröffentlicht

- HENZE, F.; BURWITZ, H.; SIEDLER, G.: Recording and Documentation of Archaeological and Architectural Fragments using Automated Stereo Photogrammetry. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia (VSMM)*, Limassol, Cyprus, 20.- 25. October, 2008
- HENZE, F.; LEHMANN, H.; BRUSCHKE, B.: Nutzung historischer Pläne und Bilder für die Stadtforschungen in Baalbek / Libanon. In: *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation* (2009), Nr. 3, S. 221–234
- HENZE, F.; SIEDLER, G.; VETTER, S.: Integration of Digital Image Analysis for Automated Measurements into a Photogrammetric Stereo Evaluation System. In: MAAS, H.-G.; SCHNEIDER, D. (Hrsg.): *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology'*, Dresden, Germany, Vol. XXXVI, PART 5, 2006
- HEUVEL, F. van den: Reconstruction from a Single Architectural Image from the Meydenbauer Archive. In: *Proceedings of the XVIII. International CIPA Symposium, Postdam (Germany), September 2001*, 2001, S. 699–706
- HEUVEL, F. van den: Semi-Automatic Camera Calibration and Image Orientation Using the CIPA Reference Data Set. In: *Proceedings of the XIX. International CIPA Symposium, 30 September - 04 October, 2003, Antalya, Turkey*, 2003
- HINSKEN, L.: *Algorithmen zur Beschaffung von Näherungswerten für die Orientierung von beliebig im Raum angeordneten Strahlenbündeln*. Deutsche Geodätische Kommission, 1987 (Reihe C, Nr. 333)
- HIRSCHMÜLLER, H.: Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. In: *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2005*. Bd. 2, 2005, S. 807–814
- HIRSCHMÜLLER, H.: Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. In: *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* Vol. 30 (2008), S. 328–341
- HIRSCHMÜLLER, H.: Semi-Global Matching - Motivation, Developments and Applications. In: FRITSCH, D. (Hrsg.): *Photogrammetric Week 2011*, Wichmann Verlag, 2011, S. 173–184
- HÖPCKE, W.: *Fehlerlehre und Ausgleichsrechnung*. de Gruyter, 1980
- HOUGH, P. V. C.: *Method and means for recognizing complex patterns*. 1962. – U. S. Patent 3.069.654
- HULLO, J. F.; GRUSSENMEYER, P.; FARES, S.: Photogrammetry and Dense Stereo Matching Approach Applied to the Documentation of the Cultural Heritage Site of Kilwa (Saudi Arabia). In: *Proceedings of the XXII International CIPA Symposium - Kyoto, Japan, IAPRS*, Vol. XXXVIII - 3/W8, 2009
- JÄHNE, B.: *Digitale Bildverarbeitung*. 6. Springer, 2005
- JUAN, L.; GWUN, O.: A Comparison of SIFT, PCA-SIFT and SURF. In: *International Journal of Image Processing (IJIP)* Vol. 3/4 (2009), S. 143–152
- KARRAS, G. E.; PATIAS, P.; PETSA, E.: Digital Monoplotting and Photo-Unwrapping of Developable Surfaces in Architectural Photogrammetry. In: *ISPRS Archives, Volume XXXI, Part B5*, 1996, S. 290–294

- KARRAS, G. E.; GRAMMATIKOPOULOS, L.; KALISPERAKIS, I.; PETSA, E.: Generation of Orthoimages and Perspective Views with Automatic Visibility Checking and Texture Blending. In: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* Vol. 73/4 (2007), S. 403–411
- KERSTEN, T.; LINDSTAEDT, M.; MECHELKE, K.; ZOBEL, K.: Automatische 3D-Objektrekonstruktion aus unstrukturierten digitalen Bilddaten für Anwendungen in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie. In: SEYFERT, E. (Hrsg.): *Tagungsband der 32. wissenschaftlich-technische Jahrestagung der DGPF* Bd. 21, 2012, S. 137–148
- KITAMURA, Y.; YACHIDA, M.: Tree-dimensional data acquisition by trinocular vision. In: *Advanced Robotics* Vol. 4 (1990), S. 29–42
- KLETTE, R.; ZAMPERONI, P.: *Handbook Of Image Processing Operators*. John Wiley & Sons Ltd, 1996
- KNILL, O.; RAMIREZ-HERRAN, J.: On Ullman's theorem in computer vision. In: *arXiv preprint arXiv:0708.2438* (2007)
- KOTOWSKI, R.: Basilika di San Francesco - Ein Beispiel zur simultanen Feldkalibrierung mehrerer Aufnahmesysteme. In: KUPFER, G.; WESTER-EBBINGHAUS, W. (Hrsg.): *Kammerkalibrierung in der Photogrammetrischen Praxis*. München : Deutsche Geodätische Kommission, 1985 (Reihe B, Heft Nr. 275), S. 134–141
- KOZEMPEL, K.: *Untersuchung verschiedener Matchingverfahren und Weiterentwicklung eines dieser Verfahren unter Berücksichtigung der spezifischen Struktur der zu untersuchenden Objekte*, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Diplomarbeit, 2007. – unveröffentlicht
- KRAUS, K.: *Photogrammetrie*. Bd. Band 1: Grundlagen und Standardverfahren. Dümmler Verlag, 1997
- KUNOW, J.: *Vorschläge zur systematischen Beschreibung von Keramik*. Rheinischen Landesmuseum Bonn, Rheinland-Verlag Köln, 1986 (Kunst und Altertum am Rhein, Nr. 124)
- KUPFER, G.; WESTER-EBBINGHAUS, W. (Hrsg.): *Kammerkalibrierung in der Photogrammetrischen Praxis*. Deutsche Geodätische Kommission, 1985 (Reihe B, Heft Nr. 275)
- LÄBE, T.; FÖRSTNER, W.: Geometric stability of lowcost digital consumer cameras. In: *Proceedings of the 20th ISPRS Congress, Istanbul, Turkey* Bd. 35/5, 2004, S. 528–535
- LÄBE, T.; FÖRSTNER, W.: Erfahrungen mit einem neuen vollautomatischen Verfahren zur Orientierung digitaler Bilder. In: SEYFERT, E. (Hrsg.): *Tagungsband der 25. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF, Rostock, Germany* Bd. 14, 21.–23. September 2005, S. 271–278
- LÄBE, T.; FÖRSTNER, W.: Automatic Relative Orientation of Images. In: *Proceedings of the 5th Turkish-German Joint Geodetic Days, Berlin*, 2006
- LI, R.: Erstellung Digitaler Oberflächenmodelle durch Flächen- und Kantenkorrelation. In: *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* Vol. 56/4 (1988), S. 119–130
- LOWE, D. G.: Distinctive image features from scale-invariant keypoints. In: *International Journal of Computer Vision* Vol. 60/2 (2004), S. 91–110

- LUHMANN, T.: Ein Verfahren zur rotationsinvarianten Punktbestimmung. In: *Bildmessung und Luftbildwesen* (1986), Nr. 4, S. 147–154
- LUHMANN, T.: *Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2000
- MAAS, H.-G.: *Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmesstechnik*, ETH Zürich, Dissertation Nr. 9665, 1992
- MAAS, H.-G.: *Mehrbildtechniken in der digitalen Photogrammetrie*. ETH Zürich. Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, Nr. 62, 1997
- MAAS, H.-G.: Automatic DEM generation by multi-image feature based matching. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI, Part B3*, 1996, S. 484–489
- MAAS, H.-G.: Ein Ansatz zur Selbstkalibrierung von Kameras mit instabiler innerer Orientierung. In: ALBERTZ, J.; DECH, S. (Hrsg.): *18. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF* Bd. 7, 1998, S. 47–53
- MAAS, H.-G.; NIEDERÖST, M.: The accuracy potential of large format stillvideo cameras. In: HAKIM, S. el (Hrsg.): *Videometrics V*, 1997 (SPIE Proceedings Series Vol. 3174), S. 145–152
- MEIER, H.-K.: 100 Jahre Stereophotogrammetrie. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen* (2003), Nr. 1, S. 6–10
- MEYDENBAUER, A.: *Handbuch der Messbildkunst in Anwendung auf Baudenkmäler und Reiseaufnahmen*. Halle a. S. : Verlag W. Knapp, 1911
- MEYER, R. (Hrsg.): *Albrecht Meydenbauer - Baukunst in historischen Fotografien*. VEB Fotokinoverlag Leipzig, 1985
- MORAVEC, H. P.: Towards Automatic Visual Obstacle Avoidance. In: *Proceedings of the 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Cambridge, USA*, August 1977, S. 584
- NEDEVSKI, S.; ONIGA, F.; DANESCU, R.; GRAF, T.; SCHMIDT, R.: Increased Accuracy Stereo Approach for 3D Lane Detection. In: *Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE, 2006, S. 42–49
- NEITZEL, F.; KLONOWSKI, J.: Mobile 3D-Mapping with a Low-Cost UAV System. In: *Proceedings of the Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland*, IAPRS, Vol. XXXVIII-1/C22, 2011, S. 1–6
- NIEDERÖST, M.; MAAS, H.-G.: Entwurf und Erkennung von codierten Zielmarken. In: *Tagungsband der 16. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung*. Oldenburg, 1996
- PLANCK, D.: 25 Jahre Photogrammetrie im Landesdenkmalamt Baden-Württemberg. In: ECKSTEIN, G. (Hrsg.): *Vom Messbild zur Bauanalyse - 25 Jahre Photogrammetrie im Landesdenkmalamt Baden-Württemberg*, 2001, S. 7–10

- POLLEFEYS, M.; KOCH, R.; VAN GOOL, L.: Self-calibration and metric reconstruction in spite of varying and unknown intrinsic camera parameters. In: *International Journal of Computer Vision* Vol. 32/1 (1999), S. 7–25
- PULFRICH, C.: *Die Stereoskopie im Dienste der Photometrie und Pyrometrie*. Verlag Julius Springer, Berlin, 1923
- REGENSBURGER, K.: *Photogrammetrie - Anwendungen in Wissenschaft und Technik*. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1990
- REICH, T.; DROTT, S.: *Einsatz der digitalen Stereophotogrammetrie für die Erstellung texturierter Oberflächenmodelle zur Dokumentation von archäologischen Kleinfunden und Architekturfragmenten*. 2007. – Bachelorarbeit im Studiengang Vermessungswesender Hochschule Anhalt (FH) - unveröffentlicht
- REMONDINO, F.: Detectors and descriptors for photogrammetric applications. In: *ISPRS Commission III Symposium, Bonn, Germany*, IAPRS, Vol. XXXVI, Part 3, 2006, S. 49–54
- REMONDINO, F.; FRASER, C.: Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. In: MAAS, H.-G.; SCHNEIDER, D. (Hrsg.): *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology', Dresden, Germany* Bd. XXXVI, Part 5, 2006, S. 266–272
- REMONDINO, F.; MENNA, F.: Image-based surface measurement for close-range heritage documentation. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII, part B5-1*, 2008, S. 199 – 206
- REMONDINO, F.; ZHANG, L.: Surface reconstruction algorithms for detailed close-range object modeling. In: *ISPRS Commission III Symposium, Bonn, Germany*, IAPRS, Vol. XXXVI, Part 3, 2006, S. 117–123
- REMONDINO, F.; KERSTEN, T. P.: Low-cost- und open-source-Lösungen für die automatisierte Generierung von 3D Punktwolken - ein kritischer Überblick. In: *Terrestrisches Laserscanning 2012 (TLS2012) - Beiträge zum 121. DVW-Seminar am 13. und 14. Dezember 2012 in Fulda*, Wißner-Verlag, Augsburg, 2012 (Schriftenreihe des DVW, Band 69), S. 63–80
- RHEIDT, K.; ROHN, C.: Von 3D zu 2D? Moderne Messmethoden im Bauforschungsalltag. In: HEINE, K.; RHEIDT, K.; HENZE, F.; RIEDEL, A. (Hrsg.): *Von Handaufmaß bis High Tech III - 3D in der historischen Bauforschung*, Verlag Philipp von Zabern, Mainz, 2011, S. 151–159
- RIEDEL, A.; HEINE, K.; HENZE, F. (Hrsg.): *Von Handaufmaß bis High Tech II - Informationssysteme in der historischen Bauforschung*. Verlag Philipp von Zabern, Mainz, 2007
- RIEDEL, A.; HENZE, F.; MARBS, A.: Paradigmenwechsel in der historischen Bauforschung? Ansätze für eine effektive Nutzung von 3D-Informationen. In: HEINE, K.; RHEIDT, K.; HENZE, F.; RIEDEL, A. (Hrsg.): *Von Handaufmaß bis High Tech III - 3D in der historischen Bauforschung*, Verlag Philipp von Zabern, Mainz, 2011, S. 131–141

- ROCKETT, P.: The Accuracy of Sub-Pixel Localisation in the Canny Edge Detector. In: PRIDMORE, T.; ELLIMAN, D. (Hrsg.): *Electronic Proceedings of the 10th British Machine Vision Conference*, 1999, S. 392–401
- RODEHORST, V.: *Photogrammetrische 3D-Rekonstruktion im Nahbereich durch Auto-Kalibrierung mit projektiver Geometrie*. Wissenschaftlicher Verlag, Berlin, 2004
- ROSTEN, E.; DRUMMOND, T.: Fusing points and lines for high performance tracking. In: *IEEE International Conference on Computer Vision* Bd. 2, October 2005, S. 1508–1511
- ROSTEN, E.; DRUMMOND, T.: Machine learning for high-speed corner detection. In: *European Conference on Computer Vision* Bd. 1, May 2006, S. 430–443
- ROTHERMEL, M.; WENZEL, K.; FRITSCH, D.; HAALA, N.: Sure: Photogrammetric surface reconstruction from imagery. In: *Proceedings of the LC3D Workshop, Berlin*, 2012
- RÜGER, W.; PIETSCHNER, J.; REGENSBURGER, K.: *Photogrammetrie - Verfahren und Geräte zur Kartenherstellung*. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1987
- SCHÄFER, H.: Zustands- und Materialkartierung auf der Basis photogrammetrisch erstellter Planunterlagen am südlichen Chorturm des Ulmer Münsters. In: ECKSTEIN, G. (Hrsg.): *Vom Messbild zur Bauanalyse - 25 Jahre Photogrammetrie im Landesdenkmalamt Baden-Württemberg*. Konrad Theiss Verlag, 2001, S. 105–112
- SCHARR, H.: *Optimale Operatoren in der Digitalen Bildverarbeitung*, Naturwissenschaftlich-Mathematischen Fakultät der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Dissertation, 2000
- SCHARSTEIN, D.; SZELISKI, R.: A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. In: *International journal of computer vision* Vol. 47/1-3 (2002), S. 7–42
- SCHELLER, S.; SCHNEIDER, D.: Extraktion von Primitiven aus Laserscannerpunktwolken zur Rekonstruktion von Tragwerken. In: LUHMANN, T. (Hrsg.): *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik (Beiträge Oldenburger 3D-Tage 2006)*, Verlag Herbert Wichmann, 2006
- SCHMID, C.; MOHR, R.; BAUCKHAGE, C.: Evaluation of Interest Point Detectors. In: *International Journal of Computer Vision* Vol. 37/2 (2000), S. 151–172
- SCHMID, H.: Eine allgemeine analytische Lösung für die Aufgabe der Photogrammetrie. In: *Bildmessung und Luftbildwesen* (1958), Nr. 4, S. 103–112 und BuL 1/59, S. 1–12
- SCHNEIDER, D.: *Geometrische und stochastische Modelle für die integrierte Auswertung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten*, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Dresden, Dissertation, 2009
- SCHULLER, M.: *Building Archaeology*. International Council on Monuments and Sites, 2002
- SHORTIS, M. R.; BELLMAN, C. J.; ROBSON, S.; JOHNSTON, G. J.; JOHNSON, G. W.: Stability of zoom and fixed lenses used with digital SLR cameras. In: MAAS, H.-G.; SCHNEIDER, D. (Hrsg.): *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology', Dresden, Germany*, Vol. XXXVI, Part 5, 2006, S. 285–290

- SIEDLER, G.; HEMMLEB, M.; SACHER, G.: Documentation of the Basilica of Maxentius in Rome - Methods for Providing Foundations for Monument Research. In: *Proceedings of the XVIII. International CIPA Symposium 2001, Potsdam, September 18-21*, ISPRS Archives, Vol. XXXIV-5/C7, 2001, S. 114–120
- SIEDLER, G.; SACHER, G.: Anwendungen der Architekturphotogrammetrie für Restaurierung und Denkmalpflege. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 8-9 (2007), S. 303–306
- SIEDLER, G.; SACHER, G.; VETTER, S.: Photogrammetrische Auswertung historischer Fotografien am Potsdamer Stadtschloss. In: HEINE, K.; RHEIDT, K.; HENZE, F.; RIEDEL, A. (Hrsg.): *Von Handaufmaß bis High Tech III - 3D in der historischen Bauforschung*, Verlag Philipp von Zabern, Mainz, 2011, S. 26–32
- SMITH, S. M.: *SUSAN Low Level Image Processing*. – URL <http://users.fmrib.ox.ac.uk/~steve/susan/>. – Zugriffsdatum: 26.04.2015
- SMITH, S.; BRADY, J.: SUSAN - a new approach to low level image processing. In: *International Journal of Computer Vision* Vol. 23/1 (1997), S. 45–78
- SOTOODEH, S.: Outlier detection in laserscanner point clouds. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. XXXVI, Part 5 (2006), S. 297–302
- STEGER, C.: Extracting Lines Using Differential Geometry and Gaussian Smoothing. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. XXXI, Part B3 (1996), S. 821–826
- STEGER, C.: Subpixel-Precise Extraction of Lines and Edges. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. XXXIII, Part B3 (2000), S. 141–156
- STEINBRECHER, R.: *Bildverarbeitung in der Praxis*. R. Oldenbourg Verlag, 2005
- SZANGOLIES, K.; VEB CARL ZEISS JENA (Hrsg.): *Kompendium Photogrammetrie*. Bd. XVIII. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig, 1986
- SZELISKI, R.; TORR, P.: Geometrically Constrained Structure from Motion: Points on Planes / Microsoft Research. November 1998 (MSR-TR-98-64). – Technical Report
- ULLMAN, S.: The interpretation of structure from motion. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences* Vol. 203/1153 (1979), S. 405–426
- VOSSELMAN, G.; GORTE, B.; SITHOLE, G.; RABBANI, T.: Recognising structure in laser scanner point clouds. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. XXXVI, Part 8/W2 (2004), S. 33–38
- WEFERLING, U.: *Bauaufnahme als Modellierungsaufgabe*. Bayerische Akademie der Wissenschaften, 2001 (DGK Reihe C, Heft Nr. 561). – Dissertation
- WEFERLING, U.; HEINE, K.; WULF, U. (Hrsg.): *Von Handaufmaß bis High Tech - Aufnahmeverfahren in der historischen Bauforschung*. Verlag Philipp von Zabern, Mainz, 2002
- WENZEL, K.; ROTHERMEL, M.; HAALA, N.; FRITSCH, D.: SURE - The ifp Software for Dense Image Matching. In: FRITSCH, D. (Hrsg.): *Photogrammetric Week '13*, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2013, S. 59–70

- WESTER-EBBINGHAUS, W.: Photogrammetrische Punktbestimmung durch Bündelausgleichung zur allseitigen Erfassung eines räumlichen Objektes. In: *Bildmessung und Luftbildwesen* 46(6) (1978), S. 198–204
- WESTER-EBBINGHAUS, W.: Bündeltriangulation mit gemeinsamer Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen* 3 (1985), S. 101–111
- WESTER-EBBINGHAUS, W.: Verfahren zur Feldkalibrierung von photogrammetrischen Aufnahmekammern im Nahbereich. In: KUPFER, G.; WESTER-EBBINGHAUS, W. (Hrsg.): *Kammerkalibrierung in der Photogrammetrischen Praxis*, Deutsche Geodätische Kommission, München, 1985 (Reihe B, Heft Nr. 275), S. 106–114
- WIEDEMANN, A.; HEMMLEB, M.; ALBERTZ, J.: Reconstruction of historical buildings based on images from the Meydenbauer archives. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. XXXIII, B5/2 (2000), S. 887–893
- WIEGMANN, M.: Zeichenrichtlinie des Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologie. In: *Archäologie in Sachsen-Anhalt* Band 3 (2005), S. 287–306
- WILEY, A. G.; WONG, K. W.: Geometric Calibration of Zoom Lenses for Computer Vision Metrology. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. XXIX, Part B5 (1992), S. 587–593
- WU, C.: Towards linear-time incremental structure from motion. In: *International Conference on 3D Vision - 3DV 2013*, IEEE, 2013, S. 127–134
- WULF-RHEIDT, U.; HENZE, F.: Die Fassadenkartierung - Von der photogrammetrischen Aufnahme zum Befundplan. In: HASELEY, A.; STIEHLER, A. (Hrsg.): *Der Dom St. Petri in Bautzen: Projektbericht - Untersuchungen zur nachhaltigen Instandsetzung*. TUDpress Verlag der Wissenschaften Dresden, 2008, S. 45–52
- ZHANG, C.; BALTSAVIAS, E.: Knowledge-based image analysis for 3D edge extraction and road reconstruction. In: *Proceedings of the XIX. ISPRS Congress, Amsterdam, 16-23 July 2000*, IAPRS, Vol. 33, Part B3/2, 2000, S. 1008–1115
- ZHANG, L.; GRÜN, A.: Multi-image matching for DSM generation from IKONOS imagery. In: *ISPRS, Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. 60/3 (2006), S. 195–211
- ZHANG, Z.: Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. In: *International Journal of Computer Vision* Vol. 13/2 (1994), S. 119–152
- ZLATANOVA, S.; HEUVEL, F. A. van den: Knowledge-Based Automatic 3D Line Extraction From Close Range Images. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Vol. 34, Part 5 (2002), S. 233–240

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Vermessungskunde der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg. Ich möchte an dieser Stelle allen danken, die mich in dieser Zeit unterstützt und damit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

An erster Stelle bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Bernhard Ritter, der mich in der gemeinsamen Zeit in Cottbus immer unterstützt und gefördert hat und mir viele Möglichkeiten und die nötigen Freiräume für meine wissenschaftlichen und projektbezogenen Arbeiten einräumte. Ganz besonders danke ich ihm für seine Unterstützung und die wertvollen Hinweise bei der Durchführung und Dokumentation zahlreicher photogrammetrischer Aufnahmen, vor allem im Rahmen des Baalbek-Projektes.

Bei Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas und Prof. Dr.-Ing. Klaus Rheidt bedanke ich mich für das Lesen der Arbeit und die Übernahme der Gutachtertätigkeit sowie für die wertvollen Hinweise und Anregungen zu dieser Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt den Kolleginnen und Kollegen der Lehrstühle Vermessungskunde und Baugeschichte der BTU Cottbus für die offene und freundschaftliche Arbeitsatmosphäre. Die vielen Diskussionen und die interdisziplinäre Zusammenarbeit in der Lehre sowie in verschiedenen Forschungsprojekten haben ganz wesentliche Impulse für diese Arbeit geliefert. Die meisten der gezeigten Beispiele sind auf Anregung und mit Unterstützung im Rahmen gemeinsamer Projekte entstanden.

Den Mitarbeitern der fokus GmbH Leipzig danke ich für die vielen sehr anregenden Diskussionen und Ideen sowie für die Bereitstellung von Software und die fachliche Unterstützung bei der Auswertung zahlreicher Stereomodelle. Die Erfahrungen aus meiner praktischen Tätigkeit in Leipzig haben eine wichtige Grundlage für diese Arbeit bedeutet.

Bei Dr.-Ing. Danilo Schneider vom Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden möchte ich mich ganz herzlich für die fachlichen Diskussionen und die kritischen Hinweise zu meiner Arbeit sowie für die Bereitstellung seiner Software zur Bündelblockausgleichung bedanken.

Nicht zuletzt gilt ein besonderer Dank meiner Familie, ohne deren Unterstützung und Motivation diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.